SPEKTROHELIOGRAPHISCHE UNTERSUCHUNGEN AM LICHTBOGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
ZU GÖTTINGEN

VORGELEGT

VON

OTTO OLDENBERG
AUS SCHÖNEBERG.

MIT 1 TAFEL.

GÖTTINGEN 1913.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1913

Von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juli 1913.
Referent: Herr Prof. Dr. H. Th. Simon.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

MEINEN ELTERN.

Inhalt.

I. Einleitung.

A. Ziel der Arbeit.

Die Kenntnis der Lichtbogenvorgänge systematisch zu fördern, ist eins der Ziele, die sich das Institut für angewandte Elektrizität in Göttingen seit einer Reihe von Jahren gesteckt hat. Durch eine größere Anzahl von Untersuchungen wurde über die rein elektrischen und die akustischen Vorgänge am Lichtbogen eine Klarheit gewonnen, die uns einer Beherrschung der komplizierten Erscheinungen wesentlich nähergerückt hat. Vor allen Dingen wurde dabei Wert gelegt auf die Untersuchung schnell wechselnder Vorgänge, die bei elektrischen Größen durch die dynamische Charakteristik dargestellt werden. Um den Zusammenhang dieser Vorgänge mit den optischen Erscheinungen am Lichtbogen kennen zu lernen, veranlaßte mich Prof. H. Th. Simon, die spektroheliographische Methode auf den Lichtbogen anzuwenden, die in den letzten Jahrzehnten so wesentliche, neue Kenntnisse über die Sonne hat gewinnen helfen. Und zwar war meine Aufgabe, diese Methode nicht nur für den Gleichstromlichtbogen brauchbar zu machen, sondern sie so auszugestalten, daß auch ein Wechselstromlichtbogen in jeder seiner Phasen gesondert spektroheliographisch, d. h. in dem Licht einer beliebigen Wellenlänge, beobachtet und photographiert werden könne. Also die Bildungsgeschichte des Wechselstrombogens sollte für jeden spektral analysierbaren Bestandteil seiner Gase verfolgt werden. Eine solche Untersuchung läßt, abgesehen von strahlungsmechanischen Aufschlüssen, weitere Aufklärungen über die Natur der Vorgänge erhoffen, die die Lichtbogenentladung beherrschen.

Die vorliegende Arbeit enthält die Berechnung und Konstruktion des spektroheliographischen Apparates und seine Anwendung auf die Untersuchung des Gleichstromlichtbogens.

Die Untersuchung des Wechselstromlichtbogens in dem oben angedeuteten Sinn gestattet der Apparat zwar durchzuführen; indessen wurde diese Untersuchung selbst einer späteren Arbeit vorbehalten.

B. Frühere Untersuchungen ähnlicher Art.

Beim Studium der Literatur fand sich, daß Untersuchungen des Lichtbogens ähnlicher Art bereits mehrfach gemacht worden sind, und zwar wesentlich von spektralanalytischen und strahlungsmechanischen Gesichtspunkten aus.

So hat Lenard[1]) monochromatische Bilder des Lichtbogens untersucht. Am einfachsten lassen sich diese dadurch herstellen, daß man den Lichtbogen durch ein Farbenfilter betrachtet, und damit hat Lenard auch Erfolge erzielt. Aber diese primitive Methode hat den Nachteil, daß jedes Filter einen ganzen Bereich des Spektrums durchläßt; und in dem werden oft Linien enthalten sein, von denen jede für sich eine andere Helligkeitsverteilung im Bilde verursacht. Die vollständige Trennung dieser Linien kann nur mit einem Spektralapparat ausgeführt werden.

Auf zwei Weisen vermag der Spektralapparat monochromatische Bilder zu liefern.

Zunächst kann man den Kollimatorspalt durch ein stark verkleinertes Bild des Lichtbogens ersetzen. Alsdann erscheint im Spektrum statt der gewohnten Linien eine Reihe kleiner Lichtbogenbilder; jedes dieser Bilder stellt die Teile des Lichtbogens dar, die Licht von der betreffenden Farbe ausstrahlen. Diese Methode hat zuerst Lenard auf den Lichtbogen angewandt. Er beobachtete damit im wesentlichen folgendes: Die Hauptserie von Na und ebenso die von Li liefert Bilder, deren Rand heller ist als die Mitte. Die erste Nebenserie erscheint erst weiter innen hell, gerade da, wo die Helligkeit der Hauptserie aufhört. Daran schließen sich noch weiter nach innen die höheren Nebenserien an. Diese Beobachtung deutet Lenard damit, daß jede Serie nur in einem mantelartigen Bezirk des Bogens emittiert wird, die Hauptserie draußen, daran nach innen anschließend eine Nebenserie nach der andern.

Gegen diese Beobachtungen hat Kayser[2]) Einwendungen erhoben.

Puccianti[3]) hat Kaysers Einwände zu widerlegen gesucht. Mit demselben Apparat hat er dann auch schon die einzelnen Phasen des Wechselstrombogens getrennt beobachtet.[4]) Die Zerlegung in Phasen führte er durch eine stroboskopische Scheibe aus, die auf der Achse eines Synchronmotors befestigt war. Gleichzeitig mit jeder photographischen Aufnahme wurden die Momentanwerte von Strom und Spannung mit Hilfe einer Joubertschen Scheibe gemessen. Er beobachtete zahlreiche Einzelheiten.

Eine viel vollkommenere Methode zur Herstellung monochromatischer Photographien des Lichtbogens ist die spektroheliographische. Sie beruht auf der Anwendung des Apparates, den zuerst Hale[5]) zur Untersuchung der Sonne benutzt hat.

Sauve[6]) und Nodon[7]) haben nach dem gleichen Prinzip kleinere Apparate konstruiert, die gewiß auch für den Lichtbogen anwendbar sind. Sehr ähnlich ist das Prinzip eines Apparates, den Abney[8]) angibt. Auf den Lichtbogen angewendet wurde die spektroheliographische Methode von Puccianti.[9]) Er bestätigte im wesentlichen Lenards Beobachtungen und hat noch einige neue Messungen angeschlossen. Eine Erklärung dieser Erscheinungen ist in einer Arbeit von La Rosa[10]) versucht.

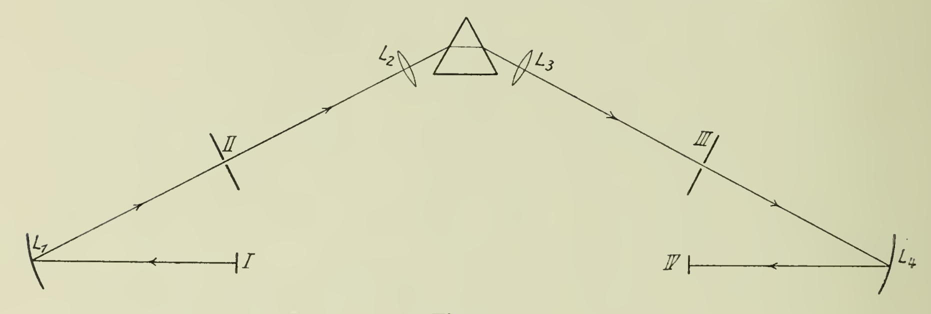
Das spaltlose Spektroskop hat gegenüber dem Spektroheliograph den Vorteil der größeren Einfachheit und der größeren Lichtstärke. Dafür hat es aber den Nachteil, daß es nur Spektren von geringer Reinheit zu benutzen gestattet, und in solchen Spektren nur Linien, die sich besonders hell von einer dunkleren Umgebung abheben. Außerdem sind solche Lichtbogenbilder immer an beiden Enden durch das kontinuierliche Spektrum der glühenden Kohlespitzen wie durch einen dicken Strich abgegrenzt. Beim Spektroheliograph wird dagegen die Untersuchung einer Linie nicht durch nahe benachbarte andere Linien gestört. Banden kann man ebenso gut wie Linien zur Aufnahme benutzen. Ferner geben diese Bilder auch seitlich neben den glühenden Kohleenden die Verteilung des leuchtenden Dampfes richtig wieder.

II. Apparat.

A. Prinzip.

Das Prinzip des von mir konstruierten Apparates tritt am einfachsten in der Anordnung von Figur 1 hervor.[11]) Ein Hohlspiegel L_1 entwirft vom Lichtbogen I ein reelles Bild auf dem Kollimator-

spalt II eines Spektralapparats. Der Spalt blendet also einen schmalen, vertikalen Bezirk aus dem Bilde aus. Von diesem entwirft der Spektralapparat mit den Linsen L_2 und L_3 bei III das Spektrum. Ein dort aufgestellter Spalt blendet ein monochromatisches Spaltbild heraus, und dieses wird durch einen zweiten Hohlspiegel L_4 bei IV abgebildet. Jetzt werde der Spiegel L_1 um eine vertikale Achse in Drehung versetzt; dann werden Bezirke, die im Bilde bei II räumlich nebeneinander liegen, durch den Kollimatorspalt zeitlich hintereinander aufgenommen und bei III abgebildet. Wird nun auch noch in fester Kuppelung mit L_1 der Spiegel L_4 gedreht, ebenfalls um eine vertikale Achse, so wird umgekehrt erreicht, daß die bei III zeitlich hintereinander ent-



Figur 1.

stehenden spaltförmigen Ausschnitte des Bildes von I bei IV wiederum zu einem richtigen Bilde räumlich nebeneinander gelegt werden, und zwar zu einem Bilde desjenigen monochromatischen Bestandteils, der durch den Spalt III herausgegriffen ist. Eine bei IV aufgestellte photographische Platte gestattet also, die Verteilung der betreffenden Lichtart im Lichtbogen zu fixieren. Hierbei erfolgt die photographische Abbildung also ähnlich wie bei einem Schlitzverschluß. Wenn die beiden gekuppelten Spiegel hinreichend schnell und häufig hin und her gedreht werden, so entsteht auf einer bei IV aufgestellten Mattscheibe ein für das Auge kontinuierlich erscheinendes Bild.

Jetzt nehmen wir an, daß beide Spiegel genau synchron mit einem Wechselstrom rotieren, der den Lichtbogen speist. Dann wird immer nur in einer bestimmten Phase des Wechsels ein Lichtbogenbild über den Spalt II hingeführt; d. h. man erhält bei IV stets nur das Bild der Lichtverteilung, wie sie in dieser Phase besteht. Die Phase läßt sich durch Drehung der gekuppelten

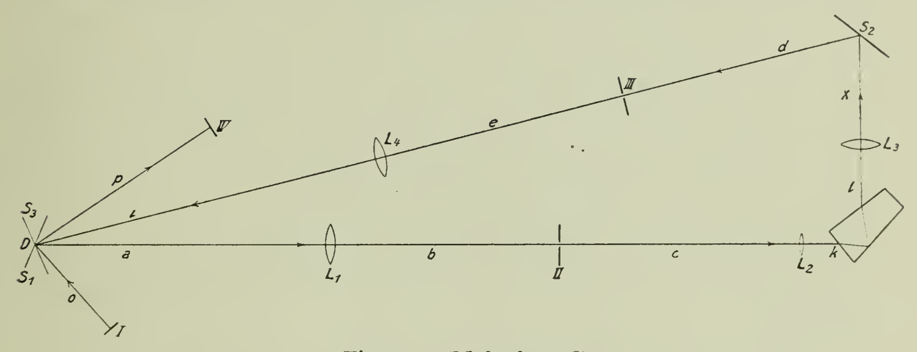
Spiegel relativ zu ihrer Achse beliebig durch die ganze Periode hin variieren.

Das Resultat ist also das gewünschte; ein solcher Apparat gestattet, das Bild des Wechselstromlichtbogens nach Farbe und nach Phase zu zerlegen.

B. Praktische Ausführung.

1. Aufstellung der optischen Teile.

Die praktische Ausführung dieses Prinzips gestaltete sich folgendermaßen: Statt der Hohlspiegel wurden Linsen und rotierende ebene Spiegel verwendet. Um einen genau synchronen Gang der



Figur 2. (Maßstab 1 : 8)

Spiegel zu erreichen, wurden beide übereinander auf dieselbe Achse gesetzt. Hierdurch wurde im Strahlengang noch eine Richtungsänderung erforderlich, die durch einen dritten, feststehenden Spiegel hergestellt wurde. So entstand das in Figur 2 angedeutete Schema. Der Lichtbogen I wird über den unteren rotierenden Spiegel S_1 durch das Objektiv L_1 auf dem Spalt II abgebildet. Vom Spalt entwerfen die Kollimatorlinse L_2, das Prisma und das Objektiv L_3 ein Spektrum in der Ebene III. Der feste Spiegel S_2 zwischen L_3 und III erteilt dem Licht wieder die Richtung auf die Drehungsachse D zu; gleichzeitig hebt er den Lichtstrahl mit einer Steigung von etwa 6^0 aus der Ebene der Zeichnung heraus nach oben, so daß der Strahl den zweiten rotierenden Spiegel S_3 trifft, der über dem ersten (gegen ihn verdreht) auf derselben Achse befestigt ist. Aus dem Spektrum blendet der Spalt III eine Linie aus, und diese wird durch die Linse L_4 und den oberen rotierenden Spiegel S_3 in der Ebene IV abgebildet.

Ich benutzte folgende Linsen:

L_1 achromatisches Fernrohrobjektiv: $f = 15{,}0$ cm,
L_2 Anastigmat von Zeiß: $f = 28{,}5$ cm,
L_3 Anastigmat von Zeiß: $f = 41{,}2$ cm,
L_4 Anastigmat von Voigtländer: $f = 18{,}0$ cm.

Der erste Spalt ist ein Präzisionsspalt der Firma Fueß; der zweite ist in der Werkstatt des unterzeichneten Instituts hergestellt.

Als Prisma benutzte ich die von Steeg & Reuter, Homburg, ausgeführte Konstruktion nach Pellin und Broca mit einer totalen Reflexion im Innern.[12]) Bei diesem Prisma wird unabhängig von der Farbe der symmetrisch durchtretende Strahl immer um 90^0 abgelenkt. Infolgedessen ist der Übergang von einer Farbe zu einer anderen lediglich durch eine Drehung des Prismentisches auszuführen, ohne daß Kollimatorrohr oder Fernrohr gedreht zu werden brauchen. Auch brauchen die Linsen nicht nachgestellt zu werden, da alle gut achromatisch sind. Daß der Wechsel der Farbe mit einem Handgriff ausführbar ist, hat den Vorteil, daß auf der Mattscheibe unmittelbar hintereinander in beliebigem Wechsel die Bilder verschiedener Farben beobachtet werden können.

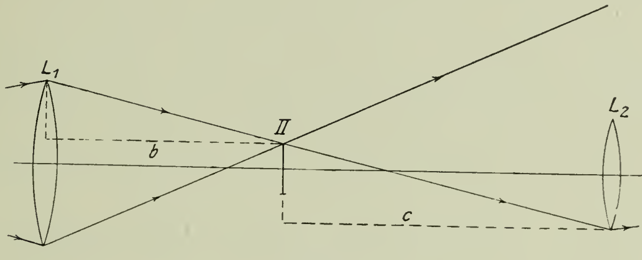
Die Stellung des Prismas zu den Linsen und die Stellung der Achse des Prismentisches wurde nach den Angaben von H. S. Uhler[13]) berechnet.

Alle optischen Teile sind auf einer optischen Bank angebracht und genau justiert. Die optische Bank ist in drei getrennten Teilen auf einer plan gehobelten, eisernen Richtplatte aufgeschroben.

2. Gesichtsfeld.

Von einem vertikalen Bezirk des Lichtbogens werden also hintereinander drei reelle Bilder entworfen, zunächst von der Linse L_1, dann vom Linsenpaar $L_2\ L_3$, schließlich von der Linse L_4. Hierbei wird im allgemeinen das Gesichtsfeld des endgültigen Bildes IV nur wenige Millimeter groß sein. Denn schon das reelle Bild II hat ja nicht alle Eigenschaften eines leuchtenden Objektes. Von diesem unterscheidet es sich vielmehr dadurch, daß von jedem Punkt des Bildes II nur ein schmales Bündel Lichtstrahlen in der Richtung nach L_2 gesandt wird. Nur solche Punkte von II liegen innerhalb eines gleichmäßig erhellten Gesichtsfeldes, welche Strahlenbündel von gleicher Öffnung in die folgenden optischen Teile hineinschicken.

Um das für alle Punkte des Lichtbogenbildes bei II zu erreichen, kann man zunächst in die Ebene des Bildes eine Linse einschalten; denn eine unendlich dünne Linse in der Bildebene hat Einfluß nur auf das Gesichtsfeld, gar nicht aber auf die Vergrößerung. Diese Methode hat Puccianti in seinem Spektroheliographen angewandt. Sie hat den Nachteil, daß an den neuen Linsen Lichtverluste durch Reflexion hinzukommen. Zweckmäßiger ist es deshalb, lediglich durch geeignete Anordnung der abbildenden Linsen das Gesichtsfeld auf eine hinreichende Größe zu bringen. Dies ist vor allem deshalb möglich, weil man sich zum Photographieren des Lichtbogens mit einem kleinen Gesichtsfeld begnügen kann. Die Überlegungen, die bei meinem Apparat zum Ziele führten, sind



Figur 3.

zwar auf die Eigenschaften der zufällig vorhandenen Linsen zugeschnitten. Ich berichte trotzdem davon, weil diese Formeln für andere Fälle leicht abgeändert werden können.

In Figur 3 ist die Kollimatorseite des Spektralapparates gezeichnet. Die Punkte von Bild II, die innerhalb eines gleichmäßig erhellten Gesichtsfeldes liegen, müssen die Forderung erfüllen, daß die zugehörigen Strahlenbündel die Linse L_2 ganz ausfüllen (und eventuell seitlich darüber hinausreichen). In Figur 3 ist das äußerste Strahlenbündel gezeichnet, das noch die Linse L_2 ausfüllt; es reicht oben darüber hinaus. Man sieht, daß dies Bündel den obersten brauchbaren Punkt des Bildes II liefert. Welche Beziehung besteht zwischen der Lage dieses Punktes und den anderen optischen Größen? In den folgenden Formeln mögen mit L_1, L_2, L_3, L_4, I, II, III, IV immer die Halbmesser der betreffenden Größen bezeichnet werden. Aus den gezeichneten ähnlichen Dreiecken ergibt sich für diesen Punkt

$$\frac{b}{c} = \frac{L_1 - \mathrm{II}}{\mathrm{II} + L_2}.$$

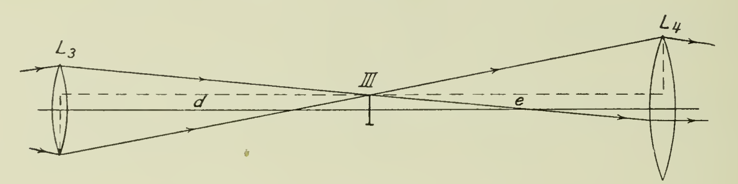
Auf der Fernrohrseite (Figur 4) stellte es sich als zweckmäßig heraus, eine andere Forderung in der Formel auszudrücken. Nur die Punkte von III liegen innerhalb eines gleichmäßig erhellten Gesichtsfeldes, deren Strahlenbündel von der Linse L_4 ganz umfaßt werden (ohne daß jedes einzelne Bündel sie ganz ausfüllt). Wieder ist das oberste brauchbare Strahlenbündel gezeichnet. Ähnliche Dreiecke liefern hier für den äußersten Punkt von III die Formel

$$\frac{e}{d} = \frac{L_4 - \mathrm{III}}{L_3 + \mathrm{III}}.$$

In meinem Apparat wird aber der Rand von L_3 nicht benutzt, da L_2 wesentlich kleiner ist. Deshalb ist statt der letzten Formel näherungsweise zu setzen

$$\frac{e}{d} = \frac{L_4 - \mathrm{III}}{L_2 + \mathrm{III}}.$$

Auf die Verwendung dieser Formeln bei der Berechnung des Apparates komme ich später zu sprechen.



Figur 4.

Diese Formeln liefern nur die obere und untere Begrenzung des Gesichtsfeldes, wie ja auch die Figuren 3 und 4 Seitenansichten sind. Seitlich ist das Gesichtsfeld noch sehr viel größer. Denn Figur 2 zeigt, daß man den rotierenden Doppelspiegel nur hinreichend weit zu drehen braucht, um einen seitlich weit entlegenen Punkt der Ebene I an der richtigen Stelle von Ebene IV zur Abbildung zu bringen.

3. Konstruktion und Lichtstärke für subjektive Beobachtung.

Hinter der Ebene IV, in welche die photographische Platte zu stellen ist, werden die Strahlen, wenn die Kassette fortgenommen ist, durch ein Okular in der Augenpupille konzentriert. Die Lichtstärke des Apparates wird durch folgende Beobachtung charakterisiert: Die Spalte wurden so eng gestellt, daß eine einzelne D-Linie von der anderen getrennt wurde; und immer noch reichte die Helligkeit zur subjektiven Beobachtung hin, obwohl bei rotierenden

Spiegeln nur während eines kleinen Teils jeder Umdrehung Licht ins Auge gelangt. Beim Gleichstromlichtbogen ist es bei lichtschwachen Linien vorteilhafter, die Spiegel mit der Hand möglichst schnell um die richtige Lage hin und her zu drehen.

4. Benutzung als Spektrometer.

Zur Beobachtung des Spektrums kann der zweite Spalt weit geöffnet und ein Okular dahinter geklappt werden. So entsteht ein Spektroskop mit einem Auflösungsvermögen von etwa 1 A.-E. im Blauen. Der Prismentisch ist durch eine Mikrometerschraube mit Trommel und Skala drehbar; daher läßt sich der Apparat nach vorangegangener Eichung auch bequem zur Wellenlängenmessung verwenden, und zwar im Blauen mit einem Fehler von weniger als 1 A.-E. Durch den zweiten Spalt kann z. B. eine *D*-Linie gut von der anderen gesondert herausgeblendet werden; es konnte leicht festgestellt werden, daß vom selben Lichtbogen die Linien Mg 5529 und Ba 5536 gänzlich verschiedene Bilder liefern.

5. Konstruktion und Betrieb der rotierenden Spiegel.

Als Spiegel sind versilberte Glasspiegel benutzt. Die rotierenden Spiegel sind planparallel, beiderseitig versilbert; jeder Spiegel ist so eingestellt, daß seine beiden Flächen genau parallel zur Drehungsachse und in gleichem Abstand von ihr liegen. Damit die Tourenzahl bis 3000 Touren pro Minute gesteigert werden kann, müssen die Spiegel sorgfältig in einem festen Rahmen und dabei genau justierbar montiert werden.

Während einer ganzen Periode des Wechselstroms machen diese doppelseitigen Spiegel eine halbe Umdrehung, da sie an einen vierpoligen Synchronmotor gekuppelt sind. So wird aus jeder ganzen Periode eine Phase ausgeblendet. Damit jede Phase des Wechselstromes, der den Lichtbogen und den Motor betreibt, nach Belieben zur Aufnahme benutzt werden kann, steht der Motor auf einer horizontalen Drehscheibe. Sind Lichtbogen und Motor in Betrieb, so erscheint auf der Mattscheibe zunächst ein monochromatisches Bild einer einzelnen Phase. Wird dann der ganze Motor auf der Drehscheibe gedreht, so ändert sich dementsprechend stetig die beobachtete Phase.

Der von der Firma H. Boas, Berlin, konstruierte Motor ist als

Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer gebaut. Wird er von der Gleichstromseite nur nahezu auf Synchronismus gebracht, so verschiebt sich im Laufe mehrerer Sekunden die beobachtete Phase von selbst stetig durch alle Werte hindurch. Auf der Mattscheibe pulsiert dann das Bild in einem langsamen Tempo, das durch die Tourenzahl des Motors beliebig eingestellt werden kann. Auf diese Weise lassen sich die verschiedenen Phasen wohl noch sicherer miteinander vergleichen, als dies durch eine Reihe gesonderter Photographien möglich ist.

Der Motor einerseits und der Spiegelapparat andererseits sind in Kugellagern getrennt gelagert; die Achsen sind durch eine Lederscheibenkuppelung verbunden. Der Lichtbogen, der Motor, die rotierenden Spiegel und der Spektralapparat sind auf vier Zementröhren gestellt, die durch Zement fest mit dem Fußboden verbunden sind. So können Tourenzahlen bis zu 3000 Touren pro Minute ohne störende Erschütterung des Apparates erreicht werden.

C. Fehlerquellen.

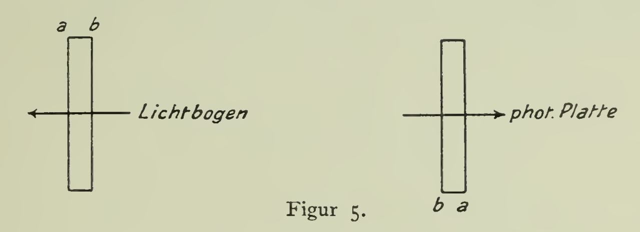
1. Die Anzahl der Bildumkehrungen.

Bei der Anordnung von Figur 1, an der oben (Seite 10) das Prinzip des Spektroheliographen auseinandergesetzt wurde, sei der Umdrehungssinn des ersten Hohlspiegels L_1 gegeben. Wir müssen fragen, ob jetzt der Umdrehungssinn des anderen Hohlspiegels L_4 noch willkürlich gewählt werden darf. Offenbar ist dies erlaubt, wenn die Breite des Spaltes vernachlässigt werden kann. Anders ist es, wenn der Spalt einige Zehntel Millimeter breit ist; das ist gewiß zulässig, wenn zur Aufnahme eine Spektrallinie benutzt wird, in deren nächster Nähe keine Linien von vergleichbarer Helligkeit liegen; vorteilhaft ist dies, weil bei breitem Spalt eine kurze Belichtungsdauer genügt, so daß keine Unschärfe durch Schwankung des Lichtbogens zu befürchten ist.

In einem bestimmten Augenblick möge der in Figur 5 gezeichnete spaltförmige Bezirk des Lichtbogens zur Abbildung gelangen; zwei seiner Ecken sind durch *a*, *b* bezeichnet. Der Apparat kehrt das Bild dreimal um; so entsteht das gezeichnete Spaltbild auf der photographischen Platte. Durch Drehung des Spiegels L_1 möge sich der gezeichnete Bezirk in der Pfeilrichtung über den feststehenden Lichtbogen fortschieben. Im nächsten Augenblick wird also ein Nachbarbezirk des Randes *a* abgebildet werden. Dann

muß auch auf der photographischen Platte das Licht zur Nachbarschaft des Randes *a* hingelenkt werden. Dementsprechend muß man den Umdrehungssinn des Hohlspiegels L_4 wählen. Z. B. kann man leicht überlegen, daß in dem Apparat von Figur 1 sich beide Spiegel im gleichen Sinne drehen müssen. Dasselbe gilt auch für den praktisch ausgeführten Apparat von Figur 2; deshalb ist es zulässig, die Spiegel auf eine Achse zu setzen.

In dem Spektroheliographen von Hale wird bei Benutzung breiter Spalte immer für die nötige Anzahl von Seitenumkehrungen



Figur 5.

gesorgt.[14] Dagegen besitzt der Spektroheliograph, mit dem Puccianti[15]) den Lichtbogen untersucht hat, eine Seitenumkehrung weniger. Ein Fehler ist das nicht, da Puccianti sich auf einen Spalt von 0,1 mm Breite beschränkte; es ist nur für manche Linien unvorteilhaft.

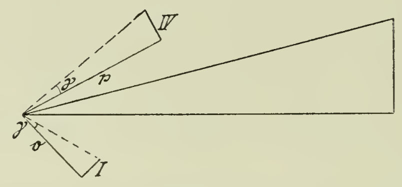
2. Verzeichnung.

Der Spektroheliograph liefert leicht Bilder mit starker Verzerrung. Dies rührt daher, daß zwei ganz verschiedene Vorgänge bei der Abbildung zusammenwirken. Wenn die Spiegel alle ruhen, wird ein vertikaler, spaltförmiger Bezirk des Lichtbogens *I* durch die Linsen mit der Vergrößerung V_v in der Ebene IV (Figur 2) abgebildet. V_v läßt sich aus den Dimensionen der Linsen berechnen oder unmittelbar messen, wenn alle Gegenstandsweiten und die zugehörigen Bildweiten bekannt sind; von der Stellung der Spiegel im Strahlengang ist V_v unabhängig, weil es Planspiegel sind.

Jetzt soll bewiesen werden, daß umgekehrt die Vergrößerung in horizontaler Richtung V_h nur von der Stellung der Spiegel abhängt, gar nicht aber von den Linsen. Der Lichtbogen habe die Breite I (Figur 6). Sein Bild wandert von einem Rand bis zum andern über den ersten Spalt des Spektralapparates, wenn nacheinander die Randstrahlen, die am rotierenden Spiegel den Winkel γ einschließen, zum Spalt hinreflektiert werden. Im selben Zeitraum

dreht sich auf der Bildseite der Strahl ebenfalls um γ; und in der Bildebene wandert der Strahl von einem Rande des Bildes zum andern. Die Breite des Bildes sei mit IV bezeichnet, die Abstände des Lichtbogens bzw. des Bildes von den rotierenden Spiegeln mit o und p. Dann ist in den ähnlichen Dreiecken von Figur 6 $\frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{I}} = \frac{p}{o}$; $\frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{I}}$ ist aber die Vergrößerung V_h eines jeden horizontalen Streifens.

Damit keine Verzerrung eintritt, muß die Vergrößerung in horizontaler und in vertikaler Richtung gleich sein, also $\frac{p}{o} = V_v$. Wenn zunächst über die Anordnung der Linsen, also über V_v eine



Figur 6.

Wahl getroffen ist (vor allem mit Rücksicht auf das Gesichtsfeld), so ist damit über die Aufstellung der rotierenden Spiegel wegen dieser Formel die Entscheidung auch schon zum Teil getroffen.

Eine unerhebliche Verzeichnung bleibt noch übrig, da die Abbildung durch ein Prisma von dem geraden Kollimatorspalt stets schwach gekrümmte Bilder liefert. Diese Krümmung läßt sich gut durch einen Kreisbogen annähern; deshalb konnte der zweite Spalt auf der Drehbank rund geschliffen werden. Die Krümmung ist für alle Farben fast dieselbe.

Eine weitere, kleine Verzeichnung wird dadurch verursacht, daß der feste Spiegel den Lichtstrahl nach dem Durchgang durchs Prisma zum oberen rotierenden Spiegel schräg hinauflenkt.

Da diese Bildfehler für alle Farben dieselben sind, stören sie nicht beim Vergleich der Bilder; und auf den kommt es allein an.

D. Zusammenfassende Darstellung der Berechnung.

Schließlich ist zusammenfassend darzustellen, wie die Formeln, die sich im Laufe der vorhergehenden Auseinandersetzung gelegentlich ergeben haben, für die Berechnung des Apparates systematisch auszunutzen sind.

Die Bedeutung der Buchstaben geht aus Figur 2 (Seite 11) hervor; darin bedeuten die Buchstaben a, d, i Strecken, die auf dem Umweg über einen Spiegel gerechnet werden.

Gegeben sind zunächst die vier Linsen L_1, L_2, L_3, L_4, für die Rechnung also ihre Brennweiten f und ihre Durchmesser.

1. Stellung der Linsen.

Gewählt wird zunächst das Gesichtsfeld in der Ebene I, bestimmt durch die maximale Länge des Lichtbogens, den man untersuchen will; ich wählte diese Länge zu 15 mm, also I = 7,5 mm. Für die Stellung der Linse L_1 ergeben sich dann die drei Formeln

$$b = c\frac{L_1 - \mathrm{II}}{\mathrm{II} + L_2} \quad \text{(Gesichtsfeld);}$$

$$\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{II}} = \frac{a}{b}; \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_1} \quad \text{(Linsenformeln).}$$

Die drei Formeln enthalten drei Unbekannte a, b, II; diese sind also durch die Formeln bestimmt. Die Ausrechnung führt auf eine quadratische Gleichung.

Zu bemerken ist, daß ein kleinerer Wert von b als der hier berechnete ein noch größeres Gesichtsfeld liefert. Jedoch ist es zweckmäßig, auf diesen Vorteil zu verzichten; denn es läßt sich zeigen, daß man gleichzeitig an Lichtstärke verliert.

Die Größen c und d sind von vornherein festgelegt als Brennweiten der Linsen L_2 und L_3; dadurch ist auch III bestimmt; k und l ergeben sich leicht daraus, wieviel Platz das Prisma in Anspruch nimmt.

Die Stellung der Linse L_4 ergibt sich aus folgenden Formeln:

$$e = d\,\frac{L_4 - \mathrm{III}}{L_2 + \mathrm{III}} \quad \text{(Gesichtsfeld);}$$

$$\frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{III}} = \frac{i}{e}; \quad \frac{1}{e} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f_4} \quad \text{(Linsenformeln).}$$

Hierdurch sind die drei Unbekannten e, i, IV vollständig bestimmt.

Diese Rechnung hat zur Voraussetzung, daß unendlich dünne Linsen benutzt werden. Bei dicken, vor allem bei unsymmetrischen Linsen kann die Rechnung nur als Annäherung aufgefaßt werden. Zur Korrektion ist es notwendig, die Bildweiten und Vergrößerungen

unmittelbar zu messen. Die gesamte Vergrößerung meines Apparates ist 1,82.

2. Stellung der Spiegel.

Willkürlich gewählt wird der Abstand o des Lichtbogens vom ersten rotierenden Spiegel. Dieser Abstand muß möglichst klein gewählt werden, damit der Bruchteil einer jeden Spiegelumdrehung, während dessen Licht durch den Apparat geht, nicht gar zu klein wird. Ich wählte $o = 12$ cm. Hierdurch ist zugleich der Abstand p der Platte vom oberen rotierenden Spiegel festgelegt, da die Vergrößerung in vertikaler Richtung $V_v = \frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{I}}$ bereits ausgerechnet ist; $p = o\frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{I}}$. Die Stellung des dritten, festen Spiegels ist durch die Größe x bestimmt. Der pytagoräische Lehrsatz auf das rechtwinkelige Dreieck von Figur 2 angewandt, liefert folgende Gleichung, in der x nunmehr die einzige Unbekannte ist:

$$(a - o + b + c + k)^2 + (l + x)^2 = (d - x + e + i - p)^2.$$

Genau genommen ist hieran noch eine einfache Korrektion anzubringen, weil die gezeichnete Hypotenuse nur die Projektion des in Wirklichkeit ansteigenden Lichtweges darstellt.

Wenn die vier Linsen gegeben sind, muß zunächst das Gesichtsfeld I gewählt werden und der Abstand o des Lichtbogens vom Spiegel. Dabei ist man praktisch an einen kleinen Spielraum gebunden. Es ist gewiß ein merkwürdiges Resultat, daß nach dieser Wahl sämtliche anderen Größen dieses komplizierten Apparates durch das eben abgeleitete Formelsystem vollständig festgelegt sind. Deshalb ist es durchaus notwendig, vor der Ausführung des Apparates die Rechnung zahlenmäßig durchzuführen.

III. Beobachtungen am Gleichstromlichtbogen.

A. Linien.

1. Herstellung der Kohlen.

Um den Lichtbogen im selben Zustand längere Zeit unverändert zu erhalten, ist eine sorgfältige Herstellung der Kohlen unentbehrlich. Das fein gepulverte Metallsalz oder auch Metallfeilspäne wurden gleichmäßig mit Rußkohle gemischt; diese Mischung wurde möglichst fest in die Höhlung einer ausgebohrten Dochtkohle gepreßt.

Diese diente als positiver Pol. Als negativer wurde Homogenkohle benutzt. Durch den Salzzusatz wird die Spannung des Lichtbogens bei gleichem Strom stark erniedrigt. Deshalb kann man an der Spannung recht genau erkennen, ob während der Beobachtungen sich die Konzentration des leuchtenden Dampfes unverändert erhält. Dies muß man natürlich verlangen, wenn man die Bilder verschiedener Linien miteinander vergleichen will.

Über die Herstellung von imprägnierten Kohlen finden sich sehr brauchbare Rezepte vor allem in Patentschriften, bei denen es sich um die Herstellung von technischen Flammenbogenkohlen handelt.[16])

2. Natrium.

a) Gemeinsame Eigenschaften aller Linien.

Die bisherigen Untersuchungen sind ganz überwiegend mit Natrium ausgeführt. Ich wiederholte diese Beobachtungen, weil die bisher publizierten Resultate Widersprüche enthalten. Meine eigene Beobachtung fügt allerdings zu den alten einen neuen Widerspruch hinzu. Nach Lenard läßt sich der Lichtbogen in eine Reihe mantelförmiger Bezirke zerlegen; ihr äußerster emittiert die Hauptserie, der nach innen anschließende die erste Nebenserie usf. Puccianti gibt dasselbe an, nur mit dem Unterschied, daß er den Mantel der zweiten Nebenserie für ebenso groß hält wie den Mantel der ersten.

Auch meine Aufnahmen zeigen die Erscheinung der Höhlung im Bilde des Lichtbogens sehr deutlich.[17]) Den Bildern sämtlicher Natriumlinien (Abb. 1—3 der Tafel) ist gemeinsam, daß in der Nähe des negativen Poles (unten) Helligkeit herrscht; hieran schließt sich ein heller Mantel an. Die Mitte des Bogens und die Nachbarschaft des positiven Kraters sind beim Bilde der Hauptserie (Abb. 1) ganz dunkel. Die Bilder der Nebenserien dagegen (Abb. 2 und 3) zeigen unmittelbar über dem positiven Pol eine helle Flamme, die bei dem Bilde der zweiten Nebenserie (Abb. 3) ganz bis zum negativen Pol hinzureichen scheint, und die von dem erwähnten, hellen Mantel durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist. Einen solchen hellen Kern innerhalb des Mantels beobachtete ich bei zahlreichen Bildern von Linien. In allen Fällen stellte sich heraus, daß der Kern von einer an derselben Stelle des Spektrums liegenden Bande herrührt. Es ist gewiß ein Vorteil der Lenardschen Methode des Objektivspektroskopes, daß die monochromatischen

Bilder von Linien nicht in dieser Weise von Banden gestört werden können; denn dort liefern Banden nur eine gleichmäßige Helligkeit des ganzen Hintergrundes. Beim Spektroheliograph kann der Anteil der Bande an einem Bilde auf verschiedene Weise herausgesondert werden. Zunächst liefert die Bande auch für benachbarte Wellenlängen dasselbe Bild. Dies läßt sich an meinem Apparat leicht subjektiv beobachten; bei kontinuierlicher Drehung des Prismentisches erscheint bei den angegebenen Natriumlinien lange Zeit hindurch der Kern hell; die Helligkeit des Mantels dagegen blitzt nur bei einer bestimmten Wellenlänge auf. Dasselbe Resultat erhält man, wenn man bei genau derselben Wellenlänge einen möglichst natriumfreien Lichtbogen[18]) monochromatisch photographiert; dies Bild (Abb. 4) zeigt nur mehr einen hellen Kern. Hieraus folgt, daß bei der Nebenserie ebenso wie bei der Hauptserie Mitte und positive Seite des Lichtbogens von der Emission frei sind oder zum mindesten arm an Emission. In einem späteren Abschnitt wird von einer Beobachtung berichtet, welche zeigt, daß die Höhlungen nicht durch Absorption oder anomale Dispersion vorgetäuscht werden, sondern daß sie reell existieren.

Auf die Höhlung hat es keinen wesentlichen Einfluß, ob die positive Kohle oben oder unten ist; durch eine solche Vertauschung wird nur der Rand des Lichtbogens, offenbar durch die aufsteigenden Luftströme etwas beeinflußt.

Auch wenn statt der positiven Kohle die negative mit Natriumsalz beschickt wird, liegt vor allem in der Nähe des negativen Poles Helligkeit. Diese reicht aber beim Bilde keiner Linie bis zum positiven Pol hin. Hierzu paßt die Annahme, in der die verschiedensten Hypothesen einig sind, daß unter den Emissionszentren dieser Linien keine negativ geladenen sind.

Im allgemeinen wird das Natriumsalz, wie gesagt, in den Docht der positiven Kohle gemischt. Also das einzige, was wir von vornherein über den Weg des Natriums im Lichtbogen wissen, ist, daß es aus dem positiven Krater kommen muß. Deshalb ist es sehr merkwürdig, daß gerade die Umgebung des positiven Kraters gar nicht oder kaum die bekanntesten Natriumserien emittiert. Im Lichtbogen muß also ein Atomzustand existieren, in dem weder die Hauptserie, noch die erste, noch die zweite Nebenserie emittiert wird.

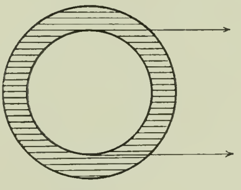
Die geschilderten Höhlungen prägen sich nur gut aus, wenn die Konzentration des leuchtenden Natriumdampfes nicht zu groß ist.

b) Unterschied zwischen Hauptserie und erster Nebenserie.

Welches sind die Unterschiede zwischen den Bildern der verschiedenen Serien?

Zunächst will ich Hauptserie und erste Nebenserie vergleichen.[19]) Ich untersuchte vor allem NaH_3, $\lambda = 589$ und Na I_4, $\lambda = 568$. Zwischen Linien gleicher Serie fand ich nie einen Unterschied. Die Photographien und ebenso subjektive Beobachtung zeigen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen Lenards und Pucciantis, daß der Mantel der Hauptserie wesentlich weiter ist als der Mantel der ersten Nebenserie. Bei dieser Nebenserie ist der Mantel überhaupt lange nicht so auffallend wie bei der Hauptserie; vielmehr ist das Bild der ersten Nebenserie vor allem durch das starke Helligkeitsmaximum vor dem negativen Pol charakterisiert. Ferner ist das Bild der Hauptserie nach außen verschwommen, das der ersten Nebenserie verhältnismäßig scharf begrenzt. Bei Verkürzung der Belichtungsdauer im Verhältnis 20 : 3 nahm der unscharfe Rand des Bildes der Hauptserie an Größe ab, das Helligkeitsmaximum des Saumes aber erschien unverändert; und verglichen werden ja nicht die Gesamtgrößen der Bilder, sondern die Lagen der Helligkeitsmaxima. Dies bestätigt die Beobachtungen, durch die Puccianti die Einwendungen Kaysers widerlegt hat.

Um die Breite der Bilder zu messen, fand ich es zweckmäßig, bei der Hauptserie auf das Helligkeitsmaximum rechts und links



Figur 7.

einzustellen, bei der ersten Nebenserie dagegen auf den äußeren Rand des Bildes; denn das sind in diesen Fällen die am besten definierten Größen. Ich fand, daß auf diese Weise gemessen die Durchmesser der genannten Bilder gleich groß sind; und zwar gilt dies unabhängig von Stromstärke, Bogenlänge und Konzentration des leuchtenden Dampfes. Figur 7 zeigt einen von der Seite in der Richtung der Pfeile betrachteten leuchtenden Hohlzylinder im

Querschnitt. Man sieht, daß der Beobachter die dickste leuchtende Schicht, also das Helligkeitsmaximum dort erblickt, wo die Höhlung beginnt, wobei allerdings von Brechung ganz abgesehen ist. Hiernach enthält die eben angegebene Beobachtung die Aussage: die Emission der ersten Nebenserie beginnt da, wo die Emission der Hauptserie aufhört.

Diese beiden Serien zeigen die größte Helligkeit in der Umgebung des negativen Kraters. Aber auch dort tritt ein Unterschied hervor, wenn man den Natriumgehalt der Kohlen stark verringert. Bei Kohlen, die Natrium nur als Verunreinigung enthalten, erscheint das Bild der D-Linien wie in Figur 8 gezeichnet. Bei

Figur 8. Figur 9.

stärkerem Natriumgehalt erscheint zwar die ganze negative Kohle dicht von Dampf umhüllt. Nun ist zu vermuten, daß durch Vermehrung des Natriums einfach die leuchtenden Schichten dicker werden, etwa wie in Figur 9 im Querschnitt gezeichnet. Ein Beobachter, der von der Seite in der Pfeilrichtung den Bogen betrachtet, wird dann über dem Krater intensive Helligkeit wahrnehmen (Abb. 1 der Tafel), die aber in Wahrheit von einer dicken Dampfschicht herrühren kann, die sich am Rande des Bogens befindet. Ganz anders verhält sich die erste Nebenserie; bei ihr ist immer, auch bei geringem Natriumgehalt, die größte Helligkeit über dem negativen Krater; der daran anschließende helle Saum ist viel schwächer als bei der Hauptserie. Das Resultat ist also, daß die Hauptserie vor allem im äußeren Mantel des Lichtbogens emittiert wird; dieser Mantel schmiegt sich dem negativen Pol so an, daß scheinbar über diesem Pol größte Helligkeit liegt. Die erste Nebenserie ist dagegen in Wirklichkeit über dem negativen Pol am hellsten.

An der ersten Nebenserie bestätigte ich eine weitere Messung von Puccianti.[20]) Gemessen wurde der Durchmesser des Bildes als Funktion der Stromstärke. Zu diesem Zweck setzte ich eine Glasscheibe mit Millimeterteilung in die Bildebene und beobachtete

durch das Okular. Dabei ergab sich, daß das Quadrat des Durchmessers, also der Querschnitt proportional dem Strom ist, d. h. die Stromdichte ist konstant.

Bei Natrium lassen sich mit meinem Apparat leicht die Komponenten von Doppellinien getrennt untersuchen. So liefern die beiden *D*-Linien ganz die gleichen Bilder; ferner sind die Bilder der Komponenten von Linie 568 untereinander gleich. Wenn man überhaupt die Komponenten eines solchen Paares verschiedenen Serien zuteilen will, was von manchen Autoren geschieht, so muß man nach dem gleichartigen Aussehen der monochromatischen Bilder doch einen besonders engen Zusammenhang zwischen diesen Serien annehmen. Das folgt ja auch schon aus der besonderen Lage dieser Linien zueinander im Spektrum. Diese Bilder lassen es also auch plausibel erscheinen, daß man beide Komponenten von Paaren zur gleichen Serie rechnet.

c) Die zweite Nebenserie.

Das monochromatische Bild, das von Linien der zweiten Nebenserie geliefert wird, ist nach Lenard noch kleiner als das von der ersten Nebenserie. Puccianti dagegen hat mit seinem Spektroheliographen für beide Nebenserien gleich große Bilder erhalten. Er erklärt Lenards Beobachtung dadurch, daß die erste Nebenserie wegen der Verschwommenheit ihrer Linien im Objektivspektroskop zu große Bilder liefert. Das ist in der Tat ein prinzipieller Mangel des Objektivspektroskopes, daß die Größe eines jeden Bildes mit von der natürlichen Schärfe der Spektrallinie abhängt.

Ich machte mit dem Spektroheliographen folgende Beobachtung (Abb. 3 der Tafel): Der helle Mantel, der von einer Linie der zweiten Nebenserie geliefert wird, ist sogar noch größer, als der Mantel eines Bildes der ersten Nebenserie; er stimmt also mit einem Mantel der Hauptserie ziemlich überein. Der Durchmesser des Lichtbogens, immer gemessen vom linken Helligkeitsmaximum bis zum rechten, beträgt auf meinen Photographien bei NaH 11,5 mm, bei Na I 10,5 mm, bei Na II wieder 11,5 mm; also die Durchmesser von H und II unterscheiden sich von I fast um 10 $^0/_0$; das liegt gewiß außerhalb der Fehlergrenze. Ferner ist bei der zweiten Nebenserie kein so auffallendes Helligkeitsmaximum über dem negativen Pol vorhanden wie bei der ersten; vielmehr ist für die zweite Nebenserie wieder die mantel-

förmige Verteilung der Helligkeit charakteristisch. Auch hierin liegt eine Ähnlichkeit mit der Hauptserie. Solche Photographien habe ich wiederholt hergestellt. Stromstärke und Bogenlänge, die einen erheblichen Einfluß auf den Durchmesser des Lichtbogens haben, wurden sorgfältig konstant gehalten; daß die Konzentration des Natriumdampfes im Bogen konstant blieb, wurde durch Beobachtung der Spannung festgestellt; immer war das Resultat dasselbe.

Daß das Bild, das von Na II geliefert wird, deutlich gehöhlt erscheint, wird durch eine Messung von Hale und Adams[21]) bestätigt. Diese photographierten nebeneinander das Spektrum von Mitte und Rand des Lichtbogens und stellten mit dem Photometer fest, daß das Paar 6155/6161 von Na II am Rand zwei bis dreimal so intensiv ist wie im Kern. Natürlich kann diese Methode keine genaueren Angaben über die Verteilung der Emission auf die Teile des Lichtbogens liefern.

Puccianti gibt selbst an, daß diese Aufnahmen mit seinem Apparat besonders schwierig gewesen und nicht immer gelungen seien. In der Tat liegen hier besondere Schwierigkeiten vor. Die zweite Nebenserie ist gut zu sehen eigentlich nur bei einigermaßen starkem Natriumbeisatz. Nun darf bei den monochromatischen Aufnahmen aber nur wenig Natrium im Lichtbogen anwesend sein, weil sich sonst die Höhlungen nicht schön ausprägen. Die Aufnahmen müssen also mit äußerst schwachen Linien vorgenommen werden. Das erste sichtbare Glied der Serie, Na II_4, liegt im Roten, ist also zum Photographieren schlecht zu brauchen; Na II_5 fällt gerade in die hellste Kohlebande, $\lambda = 5165$; so war ich auf Na II_6, $\lambda = 475$, angewiesen, wenn auch diese Linie ihrer hohen Ordnungszahl entsprechend recht lichtschwach ist. Durch solche Schwierigkeiten möchte ich das abweichende Resultat von Puccianti erklären.

Bei meinem Apparat wurde zur Aufnahme der rotierende Doppelspiegel hin und her gedreht; bei diesen schwachen Linien brauchte ich gelegentlich für eine Aufnahme 3000 solcher einzelnen Belichtungen, die etwa 20 Minuten in Anspruch nahmen. Währenddessen beobachtete ich ein stark vergrößertes Bild des Bogens, das eine Hilfslinse auf ein Stück Millimeterpapier entwarf. So konnte ich etwa alle 20 Sekunden die Bogenlänge mit der Hand genau nachregulieren, wenn nötig auch die Stromstärke. Schwankungen des Lichtbogens während der Belichtung können wohl den äußeren Rand der Bilder zu weit nach außen rücken; jedoch können sie die seitlichen Helligkeitsmaxima, nach denen ich die Breite der Bilder

beurteilte, nicht verschieben, nur unschärfer machen. Wider Erwarten lieferte dies Verfahren scharfe Bilder (Abb. 3, 4 und 5 der Tafel). Allerdings ist Abb. 5 nicht mit einer Linie der zweiten Nebenserie aufgenommen, sondern mit $\lambda = 5536$ von Barium, das als geringe Verunreinigung anwesend war (der helle Kern rührt von einer Kohlebande her); das Bild soll nur zeigen, daß diese Methode zu scharfen Bildern führt.

Lenard hat außer den drei bis dahin bekannten Serien noch weitere Natriumlinien im Lichtbogen aufgefunden und ihre Verteilung über den Bogen untersucht.[22]) Das ist mir mit dem Spektroheliographen nicht gelungen. Hier kommt ein Vorteil des Objektivspektroskopes zur Geltung; bei diesem Apparat braucht man eine Linie nur gelegentlich aufblitzen zu sehen, dann kann man schon ihr monochromatisches Bild beobachten und mit den Bildern anderer Linien, die man ja zur selben Zeit sieht, vergleichen. Im Spektroheliograph dagegen muß eine schwache Linie, damit ihr Bild photographiert werden kann, längere Zeit gleichmäßig leuchten; und auch bei der subjektiven Beobachtung, die überhaupt viel unsicherer ist, braucht man einige Zeit, um nacheinander wiederholt die verschiedenen Linien genau auf den zweiten Spalt einzustellen.

d) Folgerungen.

Lenard hat aus seinen Beobachtungen am Lichtbogen zusammen mit zahlreichen anderen Experimenten Schlüsse gezogen auf die Emissionszentren der Serien. Deshalb ist die Frage zu stellen: Wie weit werden Lenards Schlüsse durch die Abweichung, die der Spektroheliograph an der zweiten Nebenserie zeigt, beeinträchtigt? Zunächst macht Lenard die Hypothese, daß ein Atom soviel Nebenserien emittieren kann, wie es Elektronen abspalten kann. Spezieller nimmt er dann an, bei der Hauptserie sei noch kein Elektron abgegeben, bei der ersten Nebenserie eins usf. Er nimmt also an, daß die übliche Numerierung der Serien tatsächlich einer in der Natur begründeten Reihenfolge entspreche. Nur diese letzte Spezialisierung wird durch die Beobachtung mit dem Spektroheliographen unwahrscheinlich gemacht. Denn die Entdeckung, daß die Serien im Lichtbogen eine ihrer Bezeichnung entsprechende natürliche Reihenfolge besitzen, hat sich an der zweiten Nebenserie nicht bestätigt.

An manchen Punkten sind Beziehungen gefunden zwischen der Hauptserie und der zweiten Nebenserie. Rydberg[23]) hat zwischen

den Konstanten der Serienformeln einen Zusammenhang gefunden. Bei Sauerstoff kann man sogar die Formel für die Hauptserie aus der zweiten Nebenserie berechnen.[24]) Bestätigt sind diese Beziehungen durch das Intensitätsverhältnis der Komponenten eines jeden Paares.[25]) Eine Gemeinsamkeit gänzlich anderer Art besteht zwischen diesen Serien beim Zeemaneffekt;[26]) dieselben Typen erscheinen bei der Hauptserie und der zweiten Nebenserie. Eine neue Beziehung von wiederum anderer Art liefert jetzt der Spektroheliograph: Hauptserie und zweite Nebenserie bevorzugen beide im Lichtbogen denselben Ort.

Zusammenfassend ergibt sich folgendes über die Serien des Natriums: Die erste Nebenserie bevorzugt immer den Raum vor dem negativen Krater; das ist im metallhaltigen Lichtbogen der Ort des größten Potentialgefälles; denn der Salzzusatz erniedrigt nur das Potentialgefälle von Anode und Lichtbogensäule, immer bei gleichem Strom betrachtet; die Erniedrigung des Kathodenfalles ist viel unerheblicher. Dies legt die Auffassung nahe, daß diese Serie durch Zusammenstöße erregt wird, die dort besonders heftig sein müssen. Dagegen bevorzugen die Hauptserie und mit ihr die zweite Nebenserie den äußeren Mantel des Lichtbogens. Hierzu paßt gut die Hypothese, die durch andere Beobachtungen nahegelegt ist, daß die Hauptserie durch chemische Vorgänge, an denen die umgebende Luft mit beteiligt ist, also Oxydation oder Reduktion, erregt wird.

Später werde ich die monochromatischen Bilder von Banden beschreiben, die von den Molekülen chemischer Verbindungen emittiert werden (Abb. 9 der Tafel). Auch diese bevorzugen den äußeren Mantel des Lichtbogens; aber bei ihnen ist kein Unterschied zu sehen zwischen dem positiven und dem negativen Pol; an beide reichen sie rechtwinklig heran. Dagegen bei dem Bilde der *D*-Linien sieht, wie beschrieben, die positive Seite gänzlich anders aus als die negative. Deshalb muß man doch wohl bei den *D*-Linien, auch wenn man chemischen Einfluß annimmt, eine andere Natur des Emissionszentrums oder eine andere Art der Schwingungserregung annehmen als bei den Banden, wenn sich auch speziellere Vorstellungen aus diesen monochromatischen Bildern gewiß nicht herleiten lassen.

3. Lithium.

Lithium[27]) zeigte dasselbe Verhalten wie Natrium. Die Hauptserien beider Elemente liefern gleich große, gehöhlt erscheinende

Bilder, ebenfalls die ersten Nebenserien. Für die zweite Nebenserie benutzte ich Li II_4, $\lambda = 4972$. Da ich sehr lange belichten mußte, erhielt ich keine guten Bilder und kann keine so sicheren Angaben wie bei Natrium über die Größe des Mantels machen. Aber auch hier tritt gänzlich deutlich hervor, daß die erste Nebenserie über dem negativen Krater ein starkes Helligkeitsmaximum liefert, das bei dem Bilde der zweiten Nebenserie ganz oder fast ganz fehlt.

4. Calcium.

Die hellste Calciumlinie des sichtbaren Spektrums, $\lambda = 4227$ (g des Sonnenspektrums) verhält sich nach Puccianti wie eine Hauptserienlinie. Dies letztere ergibt sich auch aus meinen Beobachtungen.[28]) Mit den D-Linien hat diese Linie ja auch die weitere Eigenschaft gemeinsam, daß beides die einzigen Linien ihrer Elemente sind, die im Bunsenbrenner auftreten. Der Vergleich von $\lambda = 4227$ und einer Linie von Ca I fällt ebenso aus, wie beim Natrium der Vergleich von Hauptserie und erster Nebenserie; $\lambda = 4227$ liefert einen hellen Mantel; dessen Helligkeitsmaximum fällt mit dem Rand von Ca I, $\lambda = 4456$ zusammen. Ca I besitzt ein Helligkeitsmaximum über dem negativen Pol, schwach ausgeprägt ist der helle Mantel. Beide Linien liefern außerdem eine Lichtsäule im Kern; wie bei Natrium läßt sich jedoch beweisen, daß diese von einer Bande gleicher Wellenlänge herrührt. Die Linie 4227 liefert ein nach außen verschwommenes Bild; ganz auffallend scharf ist dagegen das Bild von Ca I begrenzt; der Durchmesser dieses Bildes ist wohl bis auf 1 $^0/_0$ genau definiert. Die Linien H und K, $\lambda = 3969$ und 3934 liefern etwa die gleichen Bilder wie die unten beschriebenen Aluminiumlinien.

Bei geringem Calciumgehalt des Bogens (gewöhnliche Dochtkohle ohne besonderen Calciumbeisatz) zeigt die Linie 4227 eine Form, die wie bei den D-Linien (S. 24) vermuten läßt, daß über dem Pol keine Emission liegt, sondern nur seitlich davon. Dagegen Ca I zeigt in diesem Fall direkt über dem negativen Pol einen kleinen, leuchtenden Ansatz.

Die zweite Nebenserie von Ca hat leider keine Linien in dem Teil des Spektrums, den man durch einen Glasapparat gut photographieren kann.

Über eine weitere Beobachtung am Ca-Spektrum berichte ich unten (S. 39).

5. Aluminium.

Lenard gibt an, die kleinsten Höhlungen im Lichtbogen habe er dicht unterhalb 4000 AE. gesehen an zwei Linien, die er, wenn auch nicht mit Sicherheit, dem Aluminium zuschreibt. Da diese Linien, $\lambda = 3962$ und $\lambda = 3944$, der zweiten Nebenserie angehören, für welche der Spektroheliograph bei Natrium ein neues Resultat ergeben hatte, untersuchte ich sie auch.[29]) Es fand sich ein wesentlich anderes Verhalten als bei Natrium und Lithium. Das Bild dieser Linien (Abb. 6 der Tafel) ist immer über die ganze Fläche des Lichtbogens hell, nach außen unscharf begrenzt; ein starkes Intensitätsmaximum liegt über dem negativen Pol. Um eine etwa vorhandene Höhlung nachzuweisen, verkürzte ich zunächst die Belichtungszeit, aber ohne Erfolg; nur die Helligkeit über dem negativen Pol blieb schließlich sichtbar. Dann benutzte ich eine von Aluminium freie Kohle in der Vermutung, daß das Bild durch eine Bande gleicher Wellenlänge gestört sei; auch das war nicht der Fall. Schließlich verringerte ich die Konzentration des leuchtenden Dampfes; der Docht der positiven Kohle bestand aus 1 Teil Al auf 300 Teile Rußkohle. Hier zeigte sich zwar etwas ähnliches wie eine Höhlung (Abb. 7 der Tafel). Aber die Form ließ schon vermuten, daß sie auf folgende Weise zustande gekommen sei: Die aus dem oberen, positiven Krater kommenden Emissionszentren geraten mitten auf ihrem Wege zum negativen Pol in die Nähe des Randes; dort werden sie von dem aufsteigenden Luftstrom ergriffen und wieder nach oben gerissen; so entstehen die seitlichen Zipfel. Diese Vermutung wurde bestätigt dadurch, daß oben und unten vertauscht wurde. Dann kann der Luftstrom nicht in dieser Weise die Strömung der positiv geladenen Metallteilchen stören, weil er gleiche Richtung hat. In der Tat verschwand dann diese Höhlung vollständig. Dagegen konnte niemals eine Höhlung bei einer Alkalilinie durch Vertauschung von oben und unten zum Verschwinden gebracht werden.

Die Serie Al II verhält sich also wesentlich anders als Na II. In der Tat scheint nach Kayser[30]) nicht eine besondere Analogie mit den Alkalimetallen hier zur Bezeichnung zweite Nebenserie geführt zu haben.

Das Resultat ist also, daß am Aluminium eine neue Form von Lichtbogenbildern gefunden wurde; ferner wurde bei dieser Gelegenheit eine Fehlerquelle nachgewiesen.

6. Magnesium.[31])

Die drei charakteristischen, grünen Magnesiumlinien, $\lambda = 5184$, 5173, 5168, liefern alle denselben Typus, der eben beim Aluminium beschrieben wurde; diese drei Linien gehören einem Triplet an.

7. Folgerung.

Lenard hat die Erwartung ausgesprochen, daß die Untersuchung monochromatischer Bilder zur Auffindung von Spektralserien führen kann. Die Methode des Objektivspektroskopes erscheint hierfür nicht vollständig zuverlässig, weil dabei die Bildgröße vom Charakter der Linie beeinflußt wird und weil man ferner manche Einzelheiten überhaupt kaum unterscheiden kann, z. B. die Schärfe des Bildrandes, ferner das Verhalten seitlich neben den Kohlen. Beim Spektroheliograph treten allerdings wesentliche Schwierigkeiten bei der Untersuchung lichtschwacher Linien auf.

Wie mannigfaltig im übrigen die Gesichtspunkte sind, nach denen die Linien gruppiert werden können, das zeigen folgende Fragen, die der Spektroheliograph im einzelnen Fall beantworten kann: Zeigt das Bild eine Höhlung? Wie groß ist eventuell der Mantel? Hat das Bild ein starkes Intensitätsmaximum an einer bestimmten Stelle? Ist die Grenze des Bildes scharf? Wie ist bei äußerst geringer Konzentration des leuchtenden Dampfes der Ansatz der Flamme am negativen Pol?

Es zeigt sich also, daß der Spektroheliograph wohl gelegentlich für das Aufsuchen von Serien bei Linien normaler Lichtstärke Verwendung finden kann.

B. Monochromatische Bilder von Banden.

1. Erster Typus.

a) Lenards Untersuchung.

Monochromatische Lichtbogenbilder mit Banden sind bisher nur mit Cy 4216 beobachtet. Diese Bande ist die einzige, die Lenard[32]) in seinem Objektivspektroskop untersuchen konnte; denn ihre Kanten übertreffen das übrige so sehr an Helligkeit, daß die Bande besonders in einem lichtschwachen Apparat fast wie eine Reihe von Linien erscheint. Lenard fand, daß diese Bande im Kern des Lichtbogens am hellsten ist und daß ihre Intensität zum

Rand abnimmt; das ganze Bild erscheint kleiner als das Bild einer Hauptserienlinie. Puccianti bestätigte dies mit dem Spektroheliographen.[33]) Auch mit meinem Apparat erhielt ich dasselbe Resultat (Abb. 8 der Tafel).

b) Neu untersuchte Banden.

Ich dehnte sodann die Untersuchung auch auf die anderen Cyan- und Kohlebanden aus; auch diese liefern alle die gleichen Bilder. Teils habe ich diese Bilder photographiert, teils mit dem Auge beobachtet. Banden, wie z. B. C 5165, die nicht annähernd so schnell abschattiert sind wie Cy 4216, sind unzugänglich für das Objektivspektroskop, sehr leicht aber zu untersuchen mit dem Spektroheliographen. Ich untersuchte folgende Kanten:

Cy 4216, 4197, 4181, 4168, 4158, 4152.
Cy 4606, 4578, 4553, 4532, 4515, 4502, 4494.
C 4737, 4714, 4697, 4684, 4680.
C 5165, 5128, 5098.
C 6535.

Ferner habe ich zahlreiche Stellen der Banden zwischen diesen Kanten untersucht und auch dabei immer Bilder von derselben Form gesehen.

Lehrreich ist eine subjektive Beobachtung des monochromatischen Bildes eines Lichtbogens, der zwischen nicht imprägnierten Kohlen brennt, während man durch langsame Drehung des Prismas allmählich alle Wellenlängen am zweiten Spalt vorüberziehen läßt. In den meisten Teilen des Spektrums erscheint das Bild, das eben für die C- und Cy-Banden beschrieben ist; z. B. im Rot ist fast nichts anderes sichtbar. Nur selten, z. B. im Grün, erscheint außerdem die Aureole hell in einer Form, die unten als zweiter Typus von Bandenbildern beschrieben wird; zwischen ihr und dem hellen Kern liegt noch ein dunkler Raum. Vereinzelt blitzen, besonders am negativen Pol, Bilder von Metallinien auf.

Sehr wohl paßt dazu der Anblick, den ein gewöhnliches, reelles Bild des Lichtbogens bietet; darin ist der Kern violett wohl vor allem durch Cy 4216, das die anderen Banden dieses Typus an Helligkeit übertrifft; der Mantel aber erscheint grünlich.

Nicht im Einklang hiermit steht eine Bemerkung von Hagenbach und Konen:[34]) „Man bemerkt im Innern des Bogens die

Cyanbanden, am Rande die sogenannten Kohlebanden“. Zwar erhält man, wenn man auch nur den äußersten Rand eines Lichtbogens auf den Spalt eines Spektrographen projiziert, die Kohle- und die Cyanbanden gut sichtbar. Jedoch zeigen die monochromatischen Bilder deutlich, daß die stärkste Emission für die Kohlebanden ebenso wie für die Cyanbanden im Kern liegt. Die Beobachtung des Lichtbogenkernes durch die durchbohrte Achse einer Kohle, worüber unten berichtet wird, bestätigt dies Resultat.

c) Zusammenhang mit einem Problem der Sonnenphysik.

Das geschilderte Verhalten der Cyanbanden im Lichtbogen läßt sich in Zusammenhang bringen mit Beobachtungen auf der Sonne. Auch auf der Sonne sind diese Banden nachgewiesen. Nun hielt Lockyer das Vorhandensein von Banden bei der Temperatur der Sonne für sehr unwahrscheinlich. Er machte deshalb die Hypothese, daß diese Banden in einiger Entfernung vom Sonnenkern emittiert würden, also in einem Niveau, wo man keine allzu hohen Temperaturen anzunehmen braucht. Hiergegen sind verschiedene Einwände erhoben. Im Widerspruch mit dieser Hypothese steht gewiß auch die Beobachtung, daß die Cyanbanden beim Lichtbogen gerade den Kern bevorzugen.

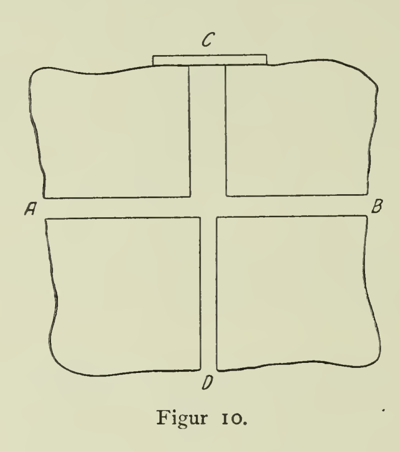
d) Herkunft der Cyanbanden.

Über die Herkunft der Cy-Banden bestehen verschiedene Ansichten. Bewiesen ist, daß C und N am Ort der Emission anwesend sein müssen. Als Emissionszentrum kann man ein Molekül einer Kohlenstoff-Stickstoffverbindung annehmen; manche Versuche sprechen aber dafür, daß nicht ein ganzes Molekül emittiert, sondern daß die Emission etwa durch Zusammenstöße von C- und N-Atomen hervorgerufen wird. Hierfür sprechen auch die geschilderten Beobachtungen; denn gerade im Kern des Lichtbogens kann man wohl kaum ein unzerstörtes Molekül annehmen.

e) Änderung der Konzentration.

Die Konzentration des emittierenden Dampfes kann bei den Metallspektren leicht durch Änderung des Salzgehaltes variiert werden. Bei den C- und Cy-Banden ist das gleiche nicht ohne

weiteres möglich. Dagegen kann man erstens die Intensität dieser Banden durch starken Zusatz irgend eines Metallsalzes schwächen. Zweitens ist etwas ähnliches wie eine Verringerung der Konzentration bei den Cy-Banden zu erreichen durch Beseitigung des Stickstoffs aus der umgebenden Atmosphäre. Das wurde mit einem Apparat ausgeführt, der einem von Kayser und Runge[35]) angegebenen nachgebildet ist. In ein Stück Retortenkohle wurden kreuzweise Löcher gebohrt (in Figur 10 im Querschnitt gezeichnet). Bei *A* und *B* wurden dünne Kohlen isoliert durchgeführt; in der Mitte brannte der Lichtbogen. *C* war durch eine Quarzplatte abgeschlossen; hierdurch wurde beobachtet. Bei *C* wurde durch eine nicht gezeichnete Öffnung, die auf der Ebene der Zeichnung senkrecht stand, Kohlensäure eingeblasen, so daß sie durch den Licht-



Figur 10.

bogen zog und bei *D* austrat. Es ergab sich, daß bei verminderter Intensität dieser Banden auch die Intensität ihrer monochromatischen Bilder gleichmäßig abnimmt.

f) Unterschied gegen die Linienbilder.

Kein einziges der von mir untersuchten Linienbilder verhält sich so wie der eben geschilderte Bandentypus. Am nächsten kommen ihm die Aluminiumlinien 3962 und 3944 (vgl. Abb. 6 und 8 der Tafel). Aber auch diese unterscheiden sich durch ein charakteristisches Merkmal von den Banden; ihre Bilder sind bei weitem am intensivsten am negativen Pol, so daß bei geringer Konzentration fast nur dort Helligkeit übrig bleibt.

2. Zweiter Typus.

a) Beschreibung der Bilder.

Einen gerade entgegengesetzten Typus von monochromatischen Bildern liefern sämtliche anderen Banden, die ich untersucht habe (Abb. 9 der Tafel).

Hier erscheint der Mantel des Lichtbogens auffallend viel intensiver leuchtend als der Kern. Natürlich sagen die Bilder nicht aus, ob das Innere des Bogens schwächer oder gar nicht emittiert. Der helle Mantel reicht rechtwinklig an die Kohlen heran. Positive und negative Seite des Bogens sehen gleich aus (abgesehen von der verschiedenen Kohlendicke). Nur reicht der leuchtende Mantel wegen der aufsteigenden Luftströme an der oberen Kohle weiter als an der unteren. Der Hohlraum ist größer als der Bereich, in dem die Cy- und C-Banden stark emittiert werden. Denn für Wellenlängen, bei denen sich beide Typen von Banden im Spektrum überdecken, erscheint im monochromatischen Bilde zwischen dem hellen Mantel und dem hellen Kern ein dunkler Zwischenraum.

b) Herkunft der Banden des zweiten Typus.

Über die Herkunft dieser Banden vom zweiten Typus ist im Gegensatz zum ersten Typus mit den monochromatischen Bildern die nächstliegende Annahme verträglich, daß die Banden vom unzerstörten Molekül einer Verbindung emittiert werden; denn im Saum des Lichtbogens kann man gewiß Moleküle annehmen.

c) Untersuchte Banden.

Im folgenden werde ich zunächst berichten, welche Banden Bilder vom zweiten Typus liefern.

Magnesium.

Untersucht wurden die dem MgO zugeschriebenen Kanten 5005, 4994, 4984, 4973, 4962. Außer dem Mantel erscheint in dieser Gegend des Spektrums der Kern des Bogens im Bilde hell; daß aber der Mantel und nicht der Kern von MgO hell geliefert wird, ergibt sich bei Betrachtung des Spektrums selbst; die charakteristisch gegliederten MgO-Banden erscheinen nur dann deutlich, wenn der Rand des Bogens auf den Collimatorspalt projiziert wird. Wird dagegen die Mitte projiziert, so erscheinen statt dessen andere Banden.

Calcium.

Untersucht wurden die Kanten des CaF_2 bei 6037, 6051, 6064, 5840 und die Kanten des $CaCl_2$ bei 618, 619, 621.

Strontium.

Untersucht wurden die Kanten des SrF_2 bei 651, 653 und die Kanten des $SrCl_2$ bei 636, 661, 674. Sodann wurde eine mit Sr-Salz imprägnierte Flammenbogenkohle für rotes Licht benutzt. Bei dieser habe ich eine Bande untersucht, deren Bau wesentlich vom gewöhnlichen abweicht; der Abstand ihrer Linien nimmt nicht bis zur Kante ab, sondern bleibt konstant = 4,0 AE. Die Kante ist nach Violett gerichtet; sie liegt bei 5629 (davor ein schwacher Vorläufer).

Barium.

Untersucht wurden die diffusen Maxima des $BaCl_2$ (?) bei 5137, 5172, 5242, 5316; ferner die Banden des BaF_2 bei 495, 499, 500. Sodann wurden die Kanten bei 5350, 5493, 5601, 5644, 5701, 5863 untersucht; von diesen geben Hagenbach und Konen[36]) an, daß ihr Bau Eigentümlichkeiten besitzt und daß sie wahrscheinlich dem Bariummetall selbst zuzuschreiben sind.

Borsäure.

Untersucht wurden die diffusen Maxima bei 600, 580, 545, 520, 490, 470, 450.

Aluminium.

Untersucht wurden die vermutlich dem Oxyd zugehörigen Kanten 5106, 5082, 4844, 4869, 4651, 4675, 4519, 4496. Bei Aluminium kann man diesen Typus von Bildern sehr gut ohne Spektroheliograph beobachten, wenn man durch eine Linse ein reelles Bild des Lichtbogens entwirft; der Docht der positiven Kohle besteht am besten aus gleichen Teilen Aluminiumfeilspänen und Rußkohle. Der Mantel des Bildes erscheint intensiv grün gefärbt. Diese Erscheinung kann nur von Banden herrühren; denn Aluminium emittiert im Lichtbogen überhaupt keine Linien im gut sichtbaren Spektrum.

Chrom.

Untersucht wurden die einer Sauerstoffverbindung zugeschriebenen Kanten bei 640, 605, 557. Außerdem erscheint bei diesen Bildern der Kern des Lichtbogens hell. Daß aber vom Chrom nur der helle Mantel herrührt, ergibt sich daraus, daß man gerade den Mantel auf den Spalt eines Spektroskopes projizieren muß, um im Spektrum die Chrombanden sichtbar zu machen.

Mangan.

Untersucht wurden die einer Sauerstoffverbindung zugeschriebenen Kanten bei 6178, 6205, 6240. Auch bei diesen Bildern erscheint wieder außer dem Mantel der Kern hell. Daß aber nur die Helligkeit des Mantels vom Mangan herrührt, wurde nach zwei Methoden festgestellt. Erstens durch Beobachtung des Spektrums wie beim Chrom; zweitens beobachtete ich monochromatische Bilder des Bogens zwischen manganfreien Kohlen für dieselben Wellenlängen; es zeigte sich, daß nach Beseitigung des Mangans die Helligkeit des Mantels verschwindet; der helle Kern aber bleibt bestehen.

Außer den hier angegebenen Kanten habe ich bei allen Banden, deren Intensität hinreicht, auch Wellenlängen zwischen den Kanten untersucht und auch dabei immer denselben Typus von Bildern gesehen.

d) Klassifizierung dieser Banden.

Die geschilderten Beobachtungen weisen darauf hin, daß hier ein allgemein gültiges Gesetz vorliegt. Um dies festzustellen, bemühte ich mich, die Untersuchung auf Banden von möglichst verschiedenen Eigenschaften auszudehnen. Die eben genannten Banden lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten in folgende Klassen teilen: Banden mit Kanten (z. B. Al und viele andere) — diffuse Banden (Borsäure, $BaCl_2$); Banden verschiedenen Baues (Ba, Sr haben Besonderheiten); Banden von Verbindungen (Oxyde, Chloride, Fluoride, Borsäure) — Banden eines Metalles selbst; die meisten Banden haben keinen nachweisbaren Zeemaneffekt — unter den untersuchten sind aber auch alle, an denen Dufour[37]) Zeemaneffekt von normaler Größe nachgewiesen hat, nämlich CaF_2, SrF_2, BaF_2, $CaCl_2$, $SrCl_2$, $BaCl_2$.

e) Änderung der Konzentration.

Die Konzentration des leuchtenden Dampfes wurde bei Al und bei Ca variiert. Bei Al wurde der Metallgehalt des Dochtes auf den 30. Teil herabgesetzt; für Ca wurde eine nicht imprägnierte Dochtkohle benutzt, die Ca nur als Verunreinigung enthielt. Immer ergab sich, daß durch die Verringerung des Metallgehaltes die Bilder der Banden gleichmäßig geschwächt werden, also anders als die Bilder von Linien. Ein Gegensatz zu den Linien zeigt sich

andrerseits auch bei sehr starker Konzentration des Dampfes, z. B. bei einem Docht aus reinem Magnesium oder aus gleichen Teilen Al und Kohle oder bei den käuflichen Flammenbogenkohlen; die Höhlung der Bandenbilder tritt gerade hier prachtvoll hervor; dagegen die Bilder von Linien erscheinen bei solcher Konzentration fast alle ungehöhlt; nur die Bilder von Flammenlinien, wie Ca 4227, Ba 5536, zeigen noch eine Spur von Höhlung.

f) Unterschied gegen die Linienbilder.

Der geschilderte zweite Typus von Bandenbildern unterscheidet sich von sämtlichen Linienbildern, die ich beobachtet habe. Am nächsten kommen ihm die Bilder von Flammenlinien, wie Na 589, Ca 4227, Ba 5536. Aber auch hier ist ein Unterschied unverkennbar, der deutlich auf den Abb. 5 und 9 der Tafel hervortritt. Der Mantel der Bande tritt rechtwinklig an die negative (obere) Kohle heran, dagegen der Mantel der Bariumlinie schmiegt sich ihr tangential an. (Der helle Kern in Abb. 5 rührt von einer Kohlebande gleicher Wellenlänge her.) Deshalb kann man auf dem Bilde einer Flammenlinie den Umriß der negativen Kohle meist überhaupt nicht unterscheiden, so dicht ist er von Dampfwolken verhüllt; darin bildet Abb. 5 eine Ausnahme, weil hierbei Barium überhaupt nur als unbeabsichtigte Verunreinigung in der Kohle anwesend war und deshalb der leuchtende Mantel dünn erscheint. Im Gegensatz dazu ist bei dem Bilde der Bande immer der Umriß auch der negativen Kohle scharf begrenzt sichtbar. Sehr augenfällig tritt dieser Gegensatz bei den gelben Banden der Borsäure hervor; bei langsamer Drehung des Prismas sieht man durch das Okular dauernd ein Bild vom zweiten Typus; nur in dem Augenblick, wo der zweite Spalt die *D*-Linien heraussondert, leuchtet die ganze Nachbarschaft der negativen Kohle hell auf.

Ein charakteristischer Gegensatz zwischen Bandenbildern einerseits und Linienbildern andererseits zeigt sich, wie unter e) angegeben, wenn man die Konzentration des leuchtenden Dampfes variiert.

3. Anwendungen.

Die letzten Abschnitte haben zu dem Resultut geführt: Banden liefern zwei wohl charakterisierte Typen von monochro-

matischen Bildern; keine einzige Linie liefert ein Bild dieser Typen. Streng beweisen läßt sich dieser Satz allerdings nur dadurch, daß sämtliche im Lichtbogen möglichen Linien und Banden untersucht werden. Zunächst jedoch werde ich diesen Satz als bewiesen annehmen.

Kayser[38]) spricht in seinem Handbuch den Satz aus, daß zwischen Banden und Linien ein fundamentaler Unterschied besteht, daß zwischen beiden also keine Übergangsgebilde möglich sind. Als Beweis führt Kayser zwei Phänomene an, bei denen sich alle Linien einerseits deutlich anders verhalten als alle Banden andererseits. Mir scheint, daß die soeben dargestellten Beobachtungen an monochromatischen Bildern ein neues Argument für Kaysers Satz liefern; denn nie habe ich ein Bild gesehen, das zwischen Bandenbildern und Linienbildern in der Mitte steht.

So deutlich erkennbar ist dieser Unterschied, daß nach dem bloßen Anblick des monochromatischen Lichtbogenbildes ohne Untersuchung des Spektrums ausgesagt werden kann, ob das Bild von einer Bande oder einer Linie herrührt. Damit ist ein Kriterium gewonnen, ob irgend eine Emission als Linie oder Bande aufzufassen ist. Angewandt habe ich dies Kriterium auf Linien der ersten Nebenserie von Calcium. Nach Rydberg[39]) legen einige Spektralformeln die Auffassung nahe, daß die Linienpaare dieser Serie in Wahrheit Kanten einer unsichtbaren Bande sind; um zu erklären, daß man von dieser Bande nichts sieht, nimmt Rydberg einen außerordentlich starken Intensitätsabfall hinter der Kante an. Daraufhin untersuchte ich das Linienpaar 4435/36. Dies monochromatische Bild hat gänzlich die Form von anderen Bildern einer Linie, und zwar einer ersten Nebenserie, charakterisiert durch einen hellen Mantel, der die positive Kohle frei läßt, an der negativen dagegen ein Intensitätsmaximum besitzt; bei hoher Konzentration verschwindet die Höhlung; ist jedoch Ca nur als Verunreinigung anwesend, bleibt nur ein sehr kleiner leuchtender Ansatz über dem negativen Pol übrig. Daraus schließe ich, daß diese Emission als Linie aufzufassen ist.

Dasselbe Kriterium könnte man z. B. auf die Phosphoremission zwischen 3200 und 3300 anwenden; nach Hagenbach u. Konen[40]) steht es nicht fest, ob dies Linien oder Banden sind. Ich kann jedoch diese Beobachtung nicht ausführen, da mein Apparat für Ultraviolett nicht durchlässig ist.

IV. Bestätigung der Resultate des Spektroheliographen.

A. Einwände gegen die monochromatischen Bilder.

Gegen die monochromatischen Bilder des Lichtbogens sind Einwände verschiedener Art erhoben. Zunächst hat Kayser Lenards Beobachtung einer Höhlung im Bilde des Lichtbogens überhaupt bestritten. Dieser Einwand ist schon durch Pucciantis Photographien widerlegt. Nach meinen Bildern erscheint es wohl auch unzweifelhaft, daß eine solche Höhlung zu beobachten ist. Weiter haben dann Stark[41]) und Kayser[42]) auf die Möglichkeit hingewiesen, daß eine Höhlung zwar auf den Bildern erscheint, daß sie aber lediglich durch optische Täuschung (Absorption, anomale Dispersion) zustande kommt. Mit diesem Einwand beschäftigen sich die folgenden Abschnitte.

B. Widerlegung durch die Bilder von Banden (zweiter Typus).

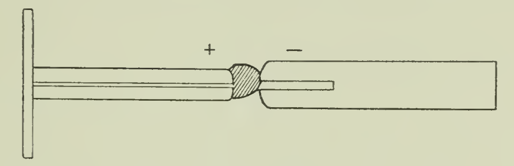
Eine große Anzahl von Banden liefert monochromatische Bilder, welche die genannte Höhlung mit großer Deutlichkeit zeigen (S. 35). Und zwar sind dies Banden, als deren Emissionszentrum meist ein Molekül angesehen wird. Nun können Moleküle gewiß nicht im Kern, wohl aber am Rande des Lichtbogens existieren. Hiernach ist es von vornherein wahrscheinlich, daß die Emission dieser Banden in einem mantelförmigen Bereich stattfindet.

Viele dieser Banden sind sehr deutlich in der Gasflamme zu beobachten. Von vornherein ist wahrscheinlich, daß der Zustand in einem Gasbrenner mehr Ähnlichkeit hat mit dem Mantel als mit dem Kern des Lichtbogens, schon deshalb, weil im Kern eine viel höhere Temperatur herrscht. Dies ist wiederum ein Grund für die Annahme, daß diese Banden nur oder überwiegend im Mantel des Bogens emittiert werden.

Wenn nun der Spektroheliograph eine sehr deutliche Höhlung an diesen Bildern zeigt (Abb. 9 der Tafel), wo man eine solche von vornherein erwarten kann, da wird man die Höhlung nicht einer optischen Täuschung zuschreiben. Und wenn man in diesem Fall eine reelle Existenz der Höhlung zugibt, da ist es eine sehr gezwungene Annahme, daß die anderen Höhlungen, die z. B. sehr schön an Na H und Na II beobachtet wurden, lediglich auf Rechnung einer Täuschung zu setzen sind.

C. Unmittelbare Untersuchung des Lichtbogenkernes durch die Achse einer Kohle.

Das Spektrum des Lichtbogenkernes kann in der üblichen Anordnung schlecht gesondert untersucht werden, weil immer die davor und dahinter liegenden Schichten des Mantels mitwirken. Deshalb hat es Interesse, das Spektrum des Kerns unabhängig vom Mantel zu untersuchen. Dies ist möglich, wenn man in die Achse der positiven Kohle einen feinen Kanal bohrt, so fein, daß der positive Krater, der ja immer den negativen an Größe weit übertrifft, die Öffnung reichlich überdeckt. Die Anordnung ist in Figur 11



Figur 11.

gezeichnet. Der Bogen steht horizontal. Die positive Kohle ist eine Dochtkohle mit ausgebohrtem Docht; die Kohle muß dünn sein, damit der positive Krater, ohne zu wandern, die ganze Endfläche und damit auch die feine Bohrung überdeckt. Das Ende wird durch eine Quarzplatte abgeschlossen, um Luftströmung längs der Achse zu verhindern. Die negative Kohle ist etwas dicker; auch ihr Docht ist auf eine kurze Strecke ausgebohrt. Dies etwas weitere Bohrloch steht der positiven Bohrung genau gegenüber. Das hat den Zweck, daß der negative Krater immer an eine Stelle seitlich von der Achse genötigt wird, so daß man durch die positive Bohrung niemals das intensive, kontinuierliche Spektrum der gegenüberstehenden Kohle erblickt, sondern nur das Spektrum des Kernes. Allerdings brennt infolgedessen der Bogen etwas unsymmetrisch, so daß man durch die Bohrung wohl auch auf ein kleines Stückchen Mantel blickt, das dicht beim negativen Krater liegt.

Schwierigkeiten machte die Zuführung der Metallsalze. Die Dochte der Kohlen sind in dieser Anordnung ja nicht mehr verfügbar. Einigermaßen brauchbar ist folgende Anordnung: Ganz dicht unter den Lichtbogen wird ein flaches, hitzebeständiges Gefäß gestellt (Deckel eines Berliner Tiegels) und hier hinein das Metallsalz gelegt. Von unten wird das Gefäß durch einen starken Bunsen-

brenner geheizt. Der Dampf des Metallsalzes zieht in den Lichtbogen. Leider bringt er meistens den Bogen zum Zischen. Dies ist nach Frau Ayrton ein Zeichen dafür, daß Luftwirbel in den Krater gelangen, und dadurch wird natürlich der normale Zustand sehr wesentlich gestört.

Leichter ist es, Aluminiumdämpfe in den Bogen zu bringen. In die positive Kohle wird eine Rinne gefeilt und ein Stück Aluminiumdraht hineingelegt. Allerdings setzt sich hierbei der Lichtbogen oft an den Draht selbst an. Dazwischen aber wandert er auch oft an das Kohlenende; und ein solcher Augenblick muß zur Aufnahme des Spektrums benutzt werden.

Am besten geht dieser Versuch aber ohne besonderen Salzzusatz. Denn auch ohne das treten ja in jedem Kohlebogen zahlreiche Linien durch Verunreinigung auf.

Das aus der Bohrung tretende Licht wurde durch eine Quarzlinse auf den Spalt eines Quarzspektrographen von Hilger konzentriert. Zum Vergleich wurde daneben immer das Spektrum des Lichtbogenrandes aufgenommen.

D. Resultate dieser Methode.

1. Lichtbogen zwischen nicht imprägnierten Kohlen.

Auf den ersten Blick ist ein Unterschied zu erkennen zwischen dem Spektrum des Randes und dem durch die Achse beobachteten Spektrum des Kerns (Abb. 10 der Tafel). Im Spektrum des Randes erblickt man in allen Bereichen Scharen von hellen Linien oder Banden. Im Spektrum des Kerns dagegen fallen durch ihre Helligkeit die Banden von Kohle und Cyan stark auf; daneben finden sich nur sehr wenig Linien von vergleichbarer Intensität, etwa drei oder vier; außerdem sind aber zahlreiche Linien sehr schwach sichtbar. Zunächst werde ich das Verhalten der einzelnen Linien im Rand und Kern vergleichen. Natürlich ist die Intensität von der Belichtungsdauer des einzelnen Spektrums abhängig. Für die folgende Vergleichung durfte deshalb nur eine Aufnahme des Kerns und eine Aufnahme des Randes herangezogen werden.[43])

Natrium.

Die D-Linien sind im Rand hell, im Kern kaum sichtbar.

Kupfer.

Die Linien 3247, 3274 sind im Rand hervorragend hell, im Kern dagegen kaum mehr wahrnehmbar.

Calcium.

Hierbei ist ein Vergleich von Ca 4227 und Cy 4216 besonders leicht möglich, da diese Linie dicht neben der Kante liegt. Im Rand ist die Ca-Linie weitaus heller als die Cy-Bande, im Kern gerade umgekehrt. Die Ca-Linien 3969 und 3934 sind im Rand auch heller als im Kern, doch ist der Unterschied lange nicht so auffallend, wie bei den meisten anderen Linien.

Quecksilber.

Die Linie 2536,6 ist im Rand viel heller als im Kern.

Aluminium.

Die Paare 3962, 3944 und 3093, 3082 erscheinen im Kern etwas schwächer als im Rand (über Al folgt näheres weiter unten).

Eisen(?).

Die Linien 2719, 2721, 4004, 4046, 4064, 4072 erscheinen im Kern viel schwächer als im Rand.

Bor.

Das Linienpaar 2498/97 ist im Rand und im Kern sehr hell. Der Rand zeigt diffuse Maxima bei 580, 550, 520, 492, 470, die gewiß mindestens z. T. von Bor herrühren (sicher lassen sie sich wegen ihrer völligen Unschärfe nicht identifizieren); dagegen ist im Rand nichts von den grünen Kohlebanden zu sehen. Umgekehrt zeigt der Kern sehr scharf diese Kohlebanden und nichts mehr von den Borbanden.

Silicium.

$\lambda = 2882$ ist im Rand und im Kern gleichmäßig sehr hell; etwas dunkler, aber auch im Kern noch gut sichtbar, ist die Gruppe 2507, 2514, 2516, 2519, 2524, 2529.

Kohle und Cyan.

Im Rand erscheinen die hellsten Banden, nämlich 3590, 3884, 4216 und (schwach) 4606; ferner die Linie 2478. Im Kern sind sämtliche Banden von Kohle und Cyan hervorragend stark, weit stärker als im Rand; das gleiche gilt für die Kohlelinie 2478; dies ist die einzige Linie, die im Kern heller ist als im Rand.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Spektralaufnahmen durch die Achse einer Kohle die reelle Existenz der Höhlungen wahrscheinlich machen, die an den monochromatischen Bildern beobachtet sind. Denn gerade die Metallinien, deren Bilder solche Höhlungen zeigen, sind im Kern des Bogens kaum sichtbar. Dagegen die Kohle- und Cyanbanden, deren monochromatische Bilder in der Mitte am hellsten sind, beherrschen das Spektrum des

Kernes. In diesem Spektrum sind neben den genannten Banden nur Linien der Nichtmetalle B, Si, C hell sichtbar.

Möglich ist allerdings, daß die Metallinien durch Absorption in der Bohrung der positiven Kohle zum Verschwinden gebracht werden. Deshalb liefert diese Beobachtung keinen zwingenden Beweis, sondern nur einen neuen Stützpunkt für eine Wahrscheinlichkeit.

2. Aluminium.

Für Aluminium wurde, wie erwähnt, ein besonderer Versuch mit einem aufgelegten Al-Draht gemacht. Das Spektrum des Randes zeigt sämtliche Al-Linien und daneben sehr kräftig die Banden des Aluminiumoxyds. Der Kern zeigt sämtliche Al-Linien, die bei Hagenbach und Konen[44]) angegeben sind, aber keine Spur von den Banden. Dazu paßt wieder sehr gut, daß die Al-Linien massive monochromatische Bilder des Lichtbogens liefern, die Banden deutlich gehöhlte.

Die Absicht, von der die vorstehende Untersuchung ihren Ausgang genommen hat, war, aus dem spektroheliographisch untersuchten, optischen Verhalten des Lichtbogens Rückschlüsse zu ziehen auf seinen ionentheoretischen Mechanismus. Indessen soll zunächst die dahingehende Verwertung der Beobachtungen zurückgestellt werden, bis weitere, namentlich die auf den Wechselstrombogen ausgedehnten Versuche einen festeren, experimentellen Untergrund geschaffen haben.

V. Zusammenfassung.

1. Nach dem Prinzip des Spektroheliographen wurde ein Apparat konstruiert, der monochromatische Bilder des Lichtbogens liefert; ferner kann der Apparat dies für die einzelnen Phasen des Wechselstromlichtbogens gesondert leisten.

2. Benutzt wurde der Apparat zunächst nur zu einer Untersuchung des Gleichstromlichtbogens. Die Untersuchung der Natriumlinien ergab folgendes: Die Hauptserie und die zweite Nebenserie werden überwiegend im Saum des Lichtbogens emittiert, die erste Nebenserie weiter im Innern. Zu den Beziehungen zwischen Hauptserie und zweiter Nebenserie, die bisher auf dem Gebiet der Serienformeln und des Zeemaneffektes bekannt sind, kommt durch diese Beobachtung eine neue hinzu.

Ferner wurden Linien einiger anderer Metalle untersucht. Aluminium und Magnesium, z. T. auch Calcium zeigen andere monochromatische Bilder als die Alkalimetalle.

3. Bei der Untersuchung von Banden wurden zwei Typen von Bildern beobachtet. Beim ersten Typus, der von sämtlichen Kohle- und Cyanbanden geliefert wird, ist der Kern des Lichtbogens gleichmäßig hell; zum Rande nimmt die Helligkeit allmählich ab. Einen gerade entgegengesetzten Typus zeigen sämtliche anderen Banden; bei diesen ist der Rand des Bogens wesentlich heller als die Mitte. Diese beiden Typen zeigen charakteristische Unterschiede gegen sämtliche Bilder, die von Linien geliefert werden. Deshalb ist das monochromatische Bild des Bogens als Kriterium anwendbar, ob eine Emission als Linie oder Bande aufzufassen ist. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Kriteriums bildete das Calciumspektrum.

4. Um Einwände zu entkräften, die gegen die scheinbare Höhlung der monochromatischen Bilder erhoben sind, wurde das Spektrum des Lichtbogenkerns durch eine feine Bohrung längs der Achse der positiven Kohle untersucht; so wurde das Spektrum des Mantels ausgeschaltet. Das Resultat ist: Wenn die Belichtungsdauer so gewählt wird, daß die Banden des ersten Typus (Kohle und Cyan) im Kern viel heller erscheinen als im Rand, so erscheinen im Gegensatz hierzu alle Metallinien sowie die Banden des zweiten Typus im Kern weitaus dunkler als im Rand. Diese Beobachtung bestätigt die Annahme, daß die an den monochromatischen Bildern beobachteten Höhlungen tatsächlich existieren.

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. H. Th. Simon; ihm bin ich hierfür sowie für mannigfache, anderweitige Förderung meines Studiums zu größtem Dank verpflichtet.

Zahlreiche, wertvolle Ratschläge verdanke ich dem früheren Assistenten Herrn Dr. Busch. Auch Herrn Mechaniker Müller spreche ich meinen besten Dank aus für die große Sorgfalt, mit der er den oben beschriebenen Apparat in der Werkstatt des Instituts für angewandte Elektrizität in Göttingen hergestellt hat.

Literatur und Anmerkungen.

1) Ann. d. Physik **11.** 636—650. 1903; **17.** 197—247. 1905.

2) Zeitschr. f. wiss. Phot. **5.** 181—183. 1907; **6.** 68—71. 1908.

3) N. Cim. (5) **14.** 218—223. 1907.

4) N. Cim. (5) **13.** 269—285. 1907. — Phys. Zeitschr. **8.** 463—471. 1907.

5) Zahlreiche Abhandlungen vor allem in Astronomy and Astrophysics und dem Astrophysical Journal. Zusammenfassende, populäre Darstellung in dem Buch: The study of stellar evolution. Chicago 1908.

6) Mem. della Soc. degli Spettroscopisti Italiani **33.** 54. 1904; Accad. dei Lincei, Rend. (5), **15.** (1) 168—173. 1906.

7) C. R. **141.** 1010. 1905.

8) Proc. Roy. Soc. **60.** 13. 1897.

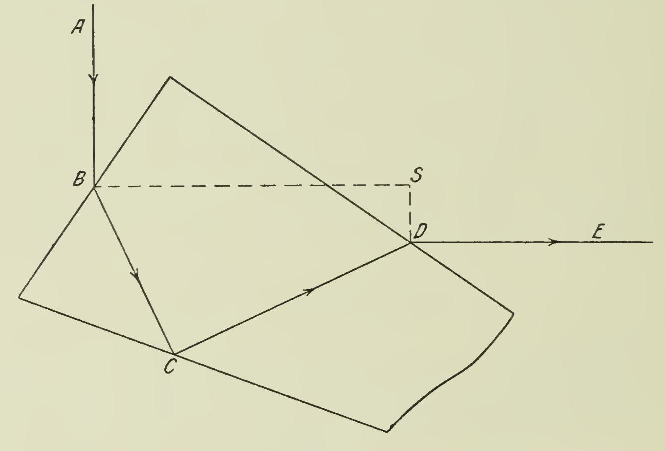
9) N. Cim. (5) **19.** 397—410. 1910.

10) Ann. d. Phys. (4) **34.** 231—234. 1911.

11) Im folgenden nenne ich jeden Apparat der hier beschriebenen Art Spektroheliograph, auch wenn er nicht zur Untersuchung der Sonne verwandt wird.

12) Journ. de Phys. (3) **8.** 314. 1899.

13) Phys. Rev. **29.** 37—55. 1909. Zu dieser Arbeit ist folgendes zu bemerken: In Figur 12 ist das Prisma gezeichnet und die Achse $ABCDE$ des Strahlenbündels



Figur 12.

für eine mittlere Farbe des Spektrums. Uhler hat auf die Möglichkeit hingewiesen, daß durch die Drehung des Prismas die Achse DE des austretenden Strahlenbündels seitlich parallel verschoben wird, also nicht mehr mit der Fernrohrachse zusammenfällt. Diese Fehlerquelle kann durch eine geeignete Stellung der Drehungsachse des Prismentisches beseitigt werden. Für deren Berechnung gibt Uhler ein verwickeltes Formelsystem an. Statt dessen kann die Stelle durch folgende Konstruktion gefunden werden: Auf AB und DE werden in B bzw. D die Senkrechten errichtet. Ihr Schnittpunkt S ist eine günstige Stellung für die Drehungsachse. Denn bei einer kleinen Drehung des Prismas um S bewegt sich B annähernd auf der Achse des Kolli-

matorrohres, D auf der Achse des Fernrohres. An Beispielen lieferte diese Konstruktion fast genau dasselbe Resultat wie die Formeln von Uhler.

14) Astrophys. Journ. **23.** 58. 1906.

15) N. Cim. (5) **19.** 397—410. 1910.

16) Angaben und Zitate stehen in dem Buch: W. Biegon v. Czudnochowski: Das elektrische Bogenlicht. Leipzig 1906, S. 479 und 537.

17) Der Docht der positiven Kohle wurde mit einer Mischung von einem Teil wasserfreiem Natriumsilikat und acht Teilen Kohle gefüllt.

18) Wenn man auch die Kohlen niemals so gründlich von Natrium säubern kann, daß die D-Linien verschwinden, so kann man doch die zweite Nebenserie leicht so gut wie vollständig beseitigen.

19) In der Bezeichnung schließe ich mich im folgenden an Lenard, Ann. d. Phys. **11.** 637. Anm. 1903 an.

20) N. Cim. (5) **19.** 408. 1910.

21) Astrophys. Journ. **25.** 86. 1907.

22) Ann. d. Phys. **11.** 647. 1903. — Hagenbach und Konen geben die Wellenlängen dieser Linien genauer an: Phys. Zeitschr. **4.** 592—594. 1902/03.

23) Kayser, Handbuch der Spektroskopie **II.** 556.

24) „ „ „ „ **II.** 564.

25) „ „ „ „ **II.** 557.

26) „ „ „ „ **II.** 670.

27) Ich benutzte in der positiven Kohle einen Docht aus einem Teil Lithiumkarbonat und zehn Teilen Kohle.

28) Ich benutzte in der positiven Kohle meist einen Docht aus einem Teil CaF_2 und zehn Teilen Kohle.

29) Ich benutzte im Docht eine Mischung von Aluminiumfeilspänen und Kohle.

30) Kayser, Handbuch **II.** 547.

31) Der Docht bestand aus Magnesiumfeilspänen und Kohle.

32) Ann. d. Phys. (4) **11.** 646. 1903.

33) N. Cim. (5) **19.** 402. 1910.

34) Spektralatlas, S. 57.

35) Abh. d. Berl. Akad. d. Wiss. 1889, S. 9.

36) Spektralatlas, S. 20.

37) C. R. **146.** 118, 229. 1908.

38) Kayser, Handbuch **II.** 257.

39) Kayser, Handbuch **II.** 537.

40) Spektralatlas, S. 47.

41) Phys. Zeitschr. **VI.** 896. 1905.

42) Zeitschr. f. wiss. Phot. **6.** 69. 1908.

43) Die Wellenlängenskala von Abb. 10 der Tafel gibt bei den langen Wellen zu große Werte an.

44) Spektralatlas, S. 23.

Lebenslauf.

Ich, Otto Oldenberg, preußischer Staatsangehöriger, bin am 2. November 1888 zu Schöneberg bei Berlin als Sohn des Professors Oldenberg geboren. Das Gymnasium besuchte ich in Kiel, und dort bestand ich Ostern 1908 die Reifeprüfung. Zum Studium der Physik und Mathematik ging ich dann zunächst auf zwei Semester nach Heidelberg; die folgenden neun Semester studierte ich in Göttingen. Seit April 1913 bin ich Assistent am Institut für angewandte Elektrizität in Göttingen.

Hauptserie $\lambda = 589$ | 1. Nebenserie $\lambda = 568$ | 2. Nebenserie $\lambda = 475$

1. (Natrium) | 2. (Natrium) | 3. (Natrium)

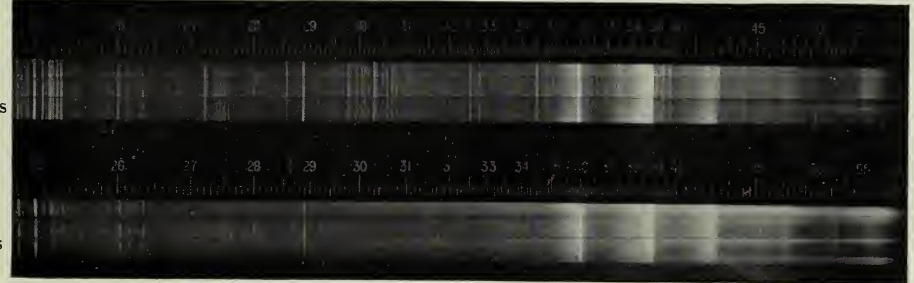
$\lambda = 475.$ | $\lambda = 5536$ | $\lambda = 3962$

4. Korrektion zu 3 | 5. (Barium) | 6. (Aluminium)

$\lambda = 3962$ | Cyan, $\lambda = 4216$ | Al_2O_3, $\lambda = 4844$

7. (Aluminium) | 8. (Banden 1. Typus) | 9. (Banden 2. Typus)

Spektrum des Randes



Spektrum des Kerns

10.

Otto Oldenberg.

Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

3 0112 072879221